

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kebutuhan energi listrik terus meningkat seiring bertambahnya aktivitas masyarakat, perkembangan teknologi, dan kebutuhan elektrifikasi pada berbagai sektor, termasuk sektor pertanian. Di sisi lain, ketergantungan terhadap pembangkit berbasis bahan bakar fosil masih menimbulkan persoalan emisi, keterbatasan sumber daya, dan kebutuhan transisi menuju sistem energi yang lebih berkelanjutan. Dalam konteks tersebut, pemanfaatan energi surya menjadi salah satu alternatif yang relevan karena Indonesia memiliki potensi radiasi matahari yang besar dan tersebar luas. Potensi tersebut menunjukkan bahwa energi surya dapat dikembangkan untuk sistem pembangkit skala kecil hingga menengah, termasuk sistem energi mandiri pada sektor pertanian [1].

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) merupakan teknologi pembangkit energi terbarukan yang mengubah radiasi matahari menjadi energi listrik melalui efek fotovoltaiik. Salah satu bentuk penerapannya adalah sistem PLTS *off-grid*, yaitu sistem fotovoltaiik yang beroperasi mandiri tanpa terhubung ke jaringan listrik utama. Pada sistem ini, keseimbangan antara daya yang dihasilkan PV, energi yang disimpan baterai, konverter daya, inverter, dan beban harus dikelola oleh sistem itu sendiri. Oleh karena itu, perubahan irradiansi, temperatur, dan beban dapat memengaruhi respons sistem secara keseluruhan [2], [3].

Rumah Hijau Poktan Mustika di Kramat Jati, Jakarta Timur, merupakan salah satu fasilitas pertanian perkotaan yang membutuhkan energi listrik untuk mendukung operasional rumah hijau. Sistem yang menjadi dasar penelitian ini merepresentasikan PLTS *off-grid* sekitar 1 kWp dengan baterai *lead-acid* 12 V 100 Ah, inverter, serta beban AC rumah hijau berupa lampu LED, kipas angin, lemari pendingin, dan *cup sealer*. Beban-beban tersebut tidak selalu aktif secara bersamaan, sehingga kebutuhan daya berubah mengikuti pola penggunaan peralatan.

Perubahan beban pada sistem PLTS *off-grid* perlu diperhatikan karena sistem tidak memiliki jaringan eksternal sebagai penyangga daya. Ketika beban meningkat atau menurun, arus yang ditarik dari sistem dapat berubah dan memengaruhi tegangan bus DC rendah, kondisi baterai, serta titik kerja PV. Kondisi ini menjadikan variasi beban sebagai salah satu faktor penting dalam evaluasi kinerja sistem PLTS *off-grid*, terutama ketika sistem melibatkan baterai dan inverter sebagai bagian dari aliran energi [3], [4].

Permasalahan utama pada modul fotovoltaik adalah karakteristik keluarannya yang bersifat *nonlinier*. Daya maksimum PV tidak diperoleh pada sembarang titik operasi, tetapi pada titik tertentu yang disebut *Maximum Power Point* (MPP). Posisi MPP dapat berubah akibat irradiansi, temperatur, dan kondisi pembebanan. Apabila titik kerja PV bergeser jauh dari MPP, daya yang diekstraksi dari PV menjadi tidak optimal. Oleh karena itu, diperlukan mekanisme *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) untuk menjaga titik kerja PV tetap berada di sekitar daerah MPP [5], [6].

Salah satu metode MPPT yang banyak dikaji adalah *Incremental Conductance* (IC). Algoritma ini menentukan posisi titik kerja PV berdasarkan perbandingan antara konduktansi inkremental dan konduktansi instan. Dengan pendekatan tersebut, algoritma dapat menentukan apakah titik kerja PV berada di sisi kiri MPP, sisi kanan MPP, atau sudah berada di sekitar MPP. Karakter ini membuat IC relevan untuk sistem PV yang mengalami perubahan kondisi operasi, termasuk perubahan beban dan irradiansi [5], [7].

Dalam penelitian ini, sistem PLTS *off-grid* dimodelkan menggunakan MATLAB/Simulink dengan konfigurasi PV array 2S×5P. Konfigurasi tersebut menghasilkan daya maksimum teoritis sekitar 1001 W pada kondisi *Standard Test Conditions* (STC). Karena tegangan PV lebih tinggi dibandingkan tegangan bus baterai 12 V, *buck converter* digunakan sebagai aktuator MPPT untuk mengatur titik kerja PV melalui perubahan *duty cycle*. Baterai, inverter, transformator step-up, filter LC, dan beban AC dimodelkan sebagai subsistem pendukung untuk membaca respons sistem secara keseluruhan, sedangkan fokus utama penelitian tetap berada pada kinerja MPPT di sisi PV.

Penelitian terdahulu dalam beberapa tahun terakhir menunjukkan bahwa algoritma MPPT, khususnya *Incremental Conductance*, masih relevan untuk dikaji dan dikembangkan. Owusu-Nyarko et al. (2021) dalam artikel **“Modified Variable Step-size Incremental Conductance Maximum Power Point Tracking of Photovoltaic Systems”** membahas pengembangan IC dengan pendekatan *variable step-size* untuk meningkatkan respons pelacakan dan mengurangi osilasi di sekitar MPP [7]. Manurung et al. (2023) dalam artikel **“Implementasi Incremental Conductance Photovoltaic MPPT pada Konverter Buck”** menunjukkan penerapan IC pada sistem PV dengan *buck converter* sebagai aktuator MPPT [8]. Kathe et al. (2023) dalam artikel **“A Comprehensive Review of Maximum Power Point Tracking (MPPT) Techniques Used in Solar PV Systems”** menegaskan bahwa teknik MPPT perlu dievaluasi berdasarkan kemampuan tracking, efisiensi, kestabilan, kompleksitas, dan kondisi operasi [3]. Al-Wesabi et al. (2024) dalam artikel **“Enhanced Incremental Conductance Maximum Power Point Tracking Algorithm for Photovoltaic Systems”** membahas pengembangan IC untuk meningkatkan respons pelacakan pada kondisi operasi yang berubah [9]. Priya dan Stonier (2026) dalam artikel **“Advancements in Maximum Power Point Tracking (MPPT) techniques for solar photovoltaic (PV) applications: A comprehensive review”** juga menunjukkan bahwa teknik MPPT masih terus dikaji untuk meningkatkan kinerja sistem PV [10].

Berdasarkan penelitian terdahulu tersebut, kajian mengenai MPPT *Incremental Conductance* umumnya masih berfokus pada pengembangan algoritma, tinjauan teknik MPPT, atau implementasi IC pada sistem PV dan konverter DC–DC. Kajian yang secara khusus menganalisis kinerja MPPT IC pada model PLTS *off-grid* sekitar 1 kWp dengan konfigurasi PV array, *buck converter*, baterai, inverter, dan variasi beban AC rumah hijau masih perlu diperkuat. Oleh karena itu, penelitian ini diarahkan untuk menganalisis kinerja algoritma MPPT *Incremental Conductance* pada sistem PLTS *off-grid* 1 kWp dengan variasi beban di Rumah Hijau Poktan Mustika, Kramat Jati, Jakarta Timur.

Penelitian ini berfokus pada evaluasi kinerja algoritma MPPT *Incremental Conductance* melalui skenario utama NASA POWER yang merepresentasikan

kondisi operasional lapangan realistis selama 24 jam di Jakarta Timur. Sebagai pelengkap, validasi model PV array dilakukan pada kondisi ideal STC (*Standard Test Conditions*) dengan irradiansi konstan 1000 W/m^2 dan temperatur 25°C , menggunakan deviasi $<5\%$ sebagai kriteria akurasi model. Skenario NASA POWER menggabungkan profil irradiansi dan temperatur dinamis dari *satellite-based* NASA POWER dengan profil beban harian sedang rumah hijau (49–609 W), menciptakan skenario operasional kompleks yang menguji responsivitas dan efektivitas algoritma MPPT terhadap fluktuasi lingkungan nyata. Periode analisis utama difokuskan pada interval C2–C6 (06:00–16:00 LST) ketika irradiansi memadai untuk evaluasi MPPT yang akurat, meskipun sistem tetap dipantau selama 24 jam penuh untuk verifikasi perilaku pada kondisi ekstrem (malam, transisi pagi/sore).

Parameter utama yang dianalisis meliputi: (1) respons parameter elektrik PV (V_{pv} , I_{pv} , P_{pv}) terhadap dinamika irradiansi dan variasi beban; (2) efisiensi pelacakan (η_{MPPT}) sebagai metrik kuantitatif performa algoritma; (3) stabilitas subsistem pendukung (tegangan baterai, arus baterai, tegangan AC RMS, *duty cycle buck converter*, indeks modulasi inverter) sebagai verifikasi kewajaran operasi sistem terintegrasi. Data NASA POWER diekstraksi dari platform NASA POWER sebagai pendekatan kondisi meteorologi berbasis data satelit yang divalidasi secara global, memberikan representasi yang lebih realistis dan defensibel dibanding simulasi kondisi ideal. Dengan pendekatan ini, penelitian mampu mengintegrasikan evaluasi teknis algoritma MPPT dengan konteks operasional praktis sistem PLTS *off-grid* di lingkungan tropis urban Indonesia.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana kinerja algoritma *Incremental Conductance* (IC) dalam menjaga titik kerja PV mendekati daerah *Maximum Power Point* (MPP) pada kondisi lingkungan dinamis NASA POWER?

2. Bagaimana respons parameter elektrik (V_{pv} , I_{pv} , P_{pv}) terhadap fluktuasi irradiansi harian yang dikombinasikan dengan variasi beban rumah hijau?
3. Berapakah nilai efisiensi pelacakan (η_{MPPT}) algoritma IC secara kuantitatif selama siklus operasional harian?
4. Bagaimana respons parameter sistem pendukung dalam memverifikasi kewajaran operasi sistem PLTS *off-grid* selama 24 jam?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah yang telah disusun, tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis kinerja algoritma MPPT IC dalam mempertahankan titik kerja PV pada daerah daya maksimum di bawah pengaruh profil cuaca dinamis NASA POWER.
2. Mengevaluasi karakteristik elektrik PV terhadap dinamika irradiansi, temperatur, dan perubahan beban peralatan rumah hijau selama siklus 24 jam.
3. Menghitung nilai efisiensi pelacakan (η_{MPPT}) secara kuantitatif untuk memvalidasi efektivitas ekstraksi daya algoritma pada skenario profil cuaca bertahap.
4. Memverifikasi stabilitas operasi subsistem pendukung (baterai, konverter, dan sisi AC) dalam melayani beban rumah hijau pada kondisi lingkungan yang berubah-ubah.

1.4 Batasan Masalah

Agar penelitian tetap terarah dan sesuai dengan tujuan yang telah ditetapkan, batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Penelitian ini menganalisis sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) *off-grid* berkapasitas sekitar 1 kWp yang dimodelkan menggunakan MATLAB/Simulink dan Simscape Electrical. Sistem direpresentasikan sebagai sistem mandiri berbasis PV array, *buck converter*, baterai, inverter, transformator step-up, filter LC, dan beban AC rumah hijau.

2. Model sistem disusun berdasarkan pendekatan konfigurasi lapangan di Rumah Hijau Poktan Mustika, Kramat Jati, Jakarta Timur. Konfigurasi tersebut meliputi PV sekitar 1 kWp, baterai *lead-acid* 12 V 100 Ah, inverter pure sine wave 12 V ke 220 V, serta beban rumah hijau berupa lampu LED, kipas angin, lemari pendingin, dan *cup sealer*. Konfigurasi ini digunakan sebagai dasar pemodelan simulasi, bukan sebagai audit teknis penuh terhadap sistem lapangan.
3. PV array dimodelkan menggunakan konfigurasi 2 seri $\times$ 5 paralel atau 2S $\times$ 5P. Parameter modul yang digunakan adalah $V_{mp}=18,30$ V, $I_{mp}=5,47$ A, $V_{oc}=22,50$ V, dan $I_{sc}=5,91$ A. Dengan konfigurasi tersebut, daya maksimum teoritis PV array pada kondisi *Standard Test Conditions* (STC) adalah sekitar 1001 W.
4. Algoritma MPPT yang digunakan adalah *Incremental Conductance*. Penelitian ini tidak membandingkan performa *Incremental Conductance* dengan metode MPPT lain seperti *Perturb and Observe*, *Fuzzy Logic*, *Neural Network*, *Particle Swarm Optimization*, atau metode optimasi lainnya.
5. Konverter DC–DC yang digunakan pada sisi PV adalah *buck converter*. Konverter ini berfungsi sebagai aktuator MPPT untuk mengubah titik kerja PV melalui pengaturan *duty cycle* dan menyalurkan daya dari PV menuju bus DC rendah. Pembahasan konverter difokuskan pada perannya dalam sistem MPPT, bukan pada perancangan detail perangkat keras konverter.
6. Baterai, inverter, transformator step-up, filter LC, dan beban AC dimodelkan sebagai subsistem pendukung. Analisis baterai dibatasi pada respons tegangan, arus, dan perannya sebagai penyangga energi. Model inverter dan sisi AC digunakan untuk merepresentasikan fungsi utama konversi DC ke AC, bukan untuk menghitung efisiensi inverter, rugi switching rinci, proteksi internal, *Total Harmonic Distortion* (THD), harmonisa arus, atau faktor daya secara formal.
7. Beban yang digunakan adalah beban rumah hijau yang terdiri dari lampu LED, kipas angin, lemari pendingin, dan *cup sealer*. Beban direpresentasikan berdasarkan daya aktif dan daya reaktif. Penelitian ini tidak memodelkan detail

dinamika motor, arus start kompresor, slip, torsi, atau karakter mekanis beban secara rinci.

8. Skenario pengujian simulasi difokuskan pada kondisi lingkungan dinamis menggunakan data irradiansi dan temperatur NASA POWER yang dikombinasikan dengan profil beban harian sedang. Kondisi STC digunakan terbatas pada validasi awal model PV array, sedangkan hasil pengujian skenario STC sebagai bagian dari hasil MPPT tidak dibahas dalam evaluasi utama guna menghindari kerancuan logika data pada siklus harian.
9. Data irradiansi dan temperatur menggunakan NASA POWER sebagai pendekatan kondisi lingkungan berbasis data satelit/model atmosfer. Penelitian ini tidak menggunakan pengukuran langsung irradiansi dan temperatur di lokasi, sehingga skenario NASA POWER tidak dimaknai sebagai validasi lapangan penuh, melainkan sebagai masukan lingkungan dinamis untuk simulasi respons sistem.
10. Analisis utama difokuskan pada respons sisi PV, yaitu tegangan PV (V_{pv}), arus PV (I_{pv}), daya PV (P_{pv}), dan *tracking efficiency* (η_{MPPT}). Parameter pendukung seperti tegangan baterai (V_{bat}), arus baterai (I_{bat}), tegangan bus DC rendah (V_{bus}), daya aktif beban (P_{load}), tegangan RMS AC (V_{rms}), dan indeks modulasi inverter (m) digunakan untuk membaca kewajaran operasi sistem, tetapi tidak dijadikan indikator utama keberhasilan MPPT.
11. Penelitian ini berbasis simulasi komputasional, sehingga pengujian perangkat keras, validasi eksperimental lapangan, desain fisik komponen, perhitungan termal, analisis ekonomi, dan studi kelayakan investasi tidak dibahas.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Manfaat Akademis

Penelitian ini dapat menambah referensi mengenai penerapan algoritma *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) *Incremental Conductance* pada sistem PLTS *off-grid* berbasis simulasi. Penelitian ini juga dapat menjadi acuan awal bagi kajian serupa yang membahas respons V_{pv} , I_{pv} , P_{pv} , *tracking efficiency* (η_{MPPT}).

2. Manfaat Teknis

Penelitian ini memberikan gambaran mengenai respons sistem PLTS *off-grid* 1 kWp ketika mengalami perubahan beban dan perubahan kondisi lingkungan. Hasil simulasi dapat digunakan untuk memahami hubungan antara perubahan beban, irradiansi, titik kerja PV, dan kinerja algoritma MPPT.

3. Manfaat bagi Lokasi Studi Kasus

Penelitian ini memberikan informasi awal berbasis simulasi mengenai sistem PLTS *off-grid* pada Rumah Hijau Poktan Mustika. Hasil penelitian ini tidak dimaksudkan sebagai audit teknis atau rekomendasi operasional langsung terhadap perangkat di lapangan, tetapi dapat menjadi bahan pertimbangan untuk evaluasi lebih lanjut.

4. Manfaat bagi Penelitian Selanjutnya

Penelitian ini dapat menjadi dasar awal untuk pengembangan penelitian berikutnya, seperti pengujian perangkat keras, pengukuran irradiansi dan temperatur langsung di lokasi, perbandingan metode MPPT, pengembangan *charge controller*, serta analisis sistem penyimpanan energi dan kualitas daya AC.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan skripsi ini disusun untuk memberikan gambaran alur pembahasan penelitian secara terstruktur, mulai dari latar belakang masalah, teori pendukung, metode simulasi, hasil pengujian, hingga kesimpulan dan saran. Skripsi ini terdiri dari lima bab dengan uraian sebagai berikut.

Bab I Pendahuluan: Bab ini menjelaskan dasar pelaksanaan penelitian, yang meliputi latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, manfaat penelitian, dan sistematika penulisan. Bab ini juga menjelaskan fokus penelitian, yaitu analisis kinerja algoritma MPPT *Incremental Conductance* pada sistem PLTS *off-grid* 1 kWp dengan variasi beban rumah hijau pada kondisi lingkungan dinamis.

Bab II Tinjauan Pustaka: Bab ini membahas teori pendukung yang menjadi dasar penelitian. Pembahasan mencakup sistem PLTS *off-grid*, karakteristik modul fotovoltaik, konfigurasi PV array, baterai, algoritma MPPT *Incremental*

Conductance, *buck converter* sebagai aktuator MPPT, subsistem pendukung, data NASA POWER, MATLAB/Simulink dan Simscape Electrical, parameter kinerja MPPT, serta kerangka teoretis penelitian.

Bab III Metodologi Penelitian: Bab ini menjelaskan jenis dan pendekatan penelitian, alur penelitian, lokasi dan objek penelitian, diagram blok sistem, spesifikasi dan parameter sistem, implementasi algoritma MPPT *Incremental Conductance*, skenario pengujian simulasi, variabel penelitian, metode pengambilan data, serta metode analisis data. Bab ini memfokuskan skenario pengujian pada skenario NASA POWER + profil beban harian sedang.

Bab IV Hasil dan Pembahasan: Bab ini menyajikan hasil simulasi dan pembahasan kinerja algoritma MPPT *Incremental Conductance*. Pembahasan mencakup realisasi model simulasi, validasi model PV array pada kondisi standar, hasil skenario NASA POWER + profil beban harian sedang selama 24 jam, serta pembahasan umum kinerja MPPT. Parameter utama yang dianalisis meliputi V_{pv} , I_{pv} , P_{pv} , dan efisiensi pelacakan (η_{MPPT}).

Bab V Kesimpulan dan Saran: Bab ini memuat kesimpulan berdasarkan hasil simulasi dan pembahasan pada Bab IV. Kesimpulan disusun sesuai dengan rumusan masalah dan tujuan penelitian yang berfokus pada kondisi lingkungan dinamis. Bab ini juga memuat saran untuk penelitian selanjutnya, seperti pengujian perangkat keras, pengukuran irradiansi dan temperatur langsung di lokasi, perbandingan metode MPPT, pengembangan charge controller, evaluasi sistem penyimpanan energi, dan analisis kualitas daya AC.