

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kebutuhan energi listrik di era modern terus mengalami peningkatan seiring dengan pertumbuhan penduduk, perkembangan teknologi, serta meningkatnya aktivitas ekonomi masyarakat. Selama ini, sebagian besar kebutuhan energi masih bergantung pada sumber energi fosil yang ketersediaannya semakin terbatas dan berdampak negatif terhadap lingkungan melalui emisi gas rumah kaca. Hal ini mendorong perlunya pengembangan energi baru terbarukan (EBT) sebagai alternatif yang lebih berkelanjutan, ramah lingkungan, serta mampu mendukung program transisi energi nasional.

Salah satu sumber energi terbarukan yang memiliki potensi besar di Indonesia adalah energi surya, mengingat letak geografis Indonesia yang berada di garis khatulistiwa dengan intensitas radiasi matahari rata-rata 4–5 kWh/m² per hari. Pemanfaatan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) menjadi salah satu solusi yang paling memungkinkan untuk diaplikasikan baik di daerah perkotaan maupun pedesaan, terutama wilayah terpencil yang belum terjangkau jaringan listrik PLN.

Namun, sistem PLTS konvensional dengan panel surya statis memiliki keterbatasan. Posisi panel yang tetap hanya optimal pada jam tertentu saat matahari berada pada sudut tertentu, sehingga konversi energi tidak maksimal. Fluktuasi produksi energi ini menimbulkan masalah terutama pada sistem off-grid, di mana pasokan listrik sepenuhnya bergantung pada energi surya dan baterai penyimpanan. Untuk mengatasi hal ini, diperlukan sistem yang mampu meningkatkan efisiensi penyerapan energi sekaligus mengelola distribusi daya secara lebih cerdas.

Penerapan solar tracking panel dual-axis pada penelitian ini difokuskan untuk memperbaiki kontinuitas suplai energi pada sistem PLTS off-grid. Dengan kemampuan mengikuti pergerakan matahari pada dua sumbu, panel surya menghasilkan profil daya yang lebih konsisten dibandingkan panel statis. Kondisi ini penting untuk mendukung sistem kontrol daya adaptif, khususnya dalam menjaga kestabilan pengisian baterai dan mengurangi risiko pengosongan energi secara berlebihan.

Selain peningkatan produksi energi, tantangan utama berikutnya adalah pengelolaan distribusi daya. Pada sistem PLTS off-grid, energi yang dihasilkan panel surya harus diatur sedemikian rupa agar mampu memenuhi beban, mengisi baterai, serta menjaga umur pakai baterai melalui manajemen pengisian yang tepat.

Sistem kontrol daya yang telah banyak diterapkan pada PLTS off-grid umumnya bekerja dengan skema ON-OFF beban berbasis ambang tegangan baterai. Skema tersebut belum sepenuhnya adaptif terhadap perubahan kondisi produksi energi panel surya dan Variasi beban, sehingga berpotensi menyebabkan penggunaan energi yang kurang optimal.

Penelitian ini menawarkan perbaikan berupa sistem kontrol daya adaptif yang memanfaatkan kombinasi data tegangan, arus, dan daya untuk menentukan strategi distribusi energi secara real-time. Dengan pendekatan ini, sistem tidak hanya merespons penurunan tegangan baterai, tetapi juga mempertimbangkan kondisi suplai energi dari panel surya sebelum melakukan pengaturan beban.

Implementasi kontrol dilakukan menggunakan mikrokontroler ESP32 yang menjalankan logika pengambilan keputusan berbasis parameter dinamis serta mendukung pemantauan jarak jauh melalui fitur IoT.

Integrasi sensor LDR dan INA226 pada sistem ini berfungsi sebagai dasar pengambilan keputusan dalam mekanisme solar tracking dan kontrol daya adaptif. Data kondisi sistem dikirimkan secara real-time melalui jaringan WiFi ke dashboard Blynk IoT dan dicatat secara otomatis ke Google Sheets untuk mendukung pemantauan jarak jauh serta evaluasi kinerja PLTS off-grid secara komprehensif.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini mengambil judul :

“RANCANG BANGUN PROTOTYPE PLTS OFF-GRID 100 WP DENGAN SOLAR TRACKING PANEL DUAL AXIS DAN SISTEM KONTROL DAYA ADAPTIF BERBASIS ESP32”. Penelitian ini diharapkan dapat menghasilkan prototipe PLTS skala kecil yang efisien, mandiri, serta relevan untuk diaplikasikan pada fasilitas umum, rumah tangga sederhana, maupun daerah terpencil yang membutuhkan pasokan listrik berkelanjutan tanpa bergantung pada jaringan listrik utama.

1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, permasalahan utama pada sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) off-grid terletak pada keterbatasan kemampuan sistem dalam menjaga kestabilan suplai daya akibat fluktuasi energi matahari. Penggunaan panel surya dengan orientasi statis menyebabkan profil daya yang tidak merata sepanjang hari, sehingga berdampak pada ketergantungan tinggi terhadap baterai penyimpanan.

Selain itu, sistem PLTS off-grid memerlukan strategi pengelolaan daya yang lebih adaptif untuk memastikan energi yang tersimpan pada baterai dapat dimanfaatkan secara optimal. Sistem kontrol daya yang bersifat statis dan hanya berbasis ambang tegangan baterai belum sepenuhnya mampu merespons perubahan kondisi produksi energi dan Variasi beban secara dinamis, sehingga berpotensi menurunkan efisiensi dan umur pakai baterai.

Di sisi lain, keterbatasan akses terhadap informasi kondisi operasional sistem secara real-time menyulitkan pengguna dalam melakukan pemantauan dan evaluasi kinerja PLTS. Oleh karena itu, diperlukan integrasi sistem monitoring berbasis Internet of Things (IoT) yang mampu menyajikan data parameter listrik dan kondisi sistem secara jarak jauh.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini difokuskan pada perancangan dan pembuatan prototipe PLTS off-grid 100 Wp yang mengintegrasikan solar tracking panel dual-axis dan sistem kontrol daya adaptif berbasis mikrokontroler ESP32, dengan dukungan monitoring IoT. Sistem ini

diharapkan mampu meningkatkan kestabilan operasi, efisiensi pengelolaan energi, serta kemandirian sistem PLTS skala mikro.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah merancang, merealisasikan, dan mengevaluasi prototipe Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) off-grid berkapasitas 100 Wp yang dilengkapi dengan sistem solar tracking dual-axis berbasis pendekatan hybrid dan sistem kontrol daya adaptif berbasis mikrokontroler ESP32, guna meningkatkan efisiensi pemanfaatan energi surya serta menjaga kestabilan distribusi daya pada sistem. Sistem yang dikembangkan mengintegrasikan aspek mekanik, elektrik, dan sistem kontrol dalam satu kesatuan terpadu, serta dilengkapi dengan monitoring berbasis Internet of Things (IoT) untuk pemantauan dan pencatatan parameter sistem secara real-time.

Sistem ini ditargetkan mampu meningkatkan energi keluaran hingga sekitar 25–35%, serta menjaga kestabilan tegangan baterai LiFePO₄ 4S dalam rentang operasional yang telah ditetapkan melalui mekanisme kontrol daya adaptif empat mode dengan hysteresis $\pm 0,1V$.

Adapun tujuan khusus dari penelitian ini meliputi:

1. Merancang dan membangun prototipe PLTS off-grid 100 Wp yang mampu beroperasi secara mandiri sebagai sumber energi listrik skala kecil, menggunakan panel surya monocrystalline dengan baterai LiFePO₄ 12V 21Ah sebagai media penyimpanan energi.
2. Mengimplementasikan sistem *solar tracking dual-axis* dengan pendekatan *hybrid* yang mengintegrasikan tiga lapisan kendali posisi: perhitungan posisi matahari berbasis waktu RTC DS3231 sebagai referensi utama, koreksi *real-time* menggunakan empat sensor LDR, serta *fine-tuning* berbasis algoritma MPPT *Perturb and Observe* untuk mengoptimalkan penyerapan radiasi matahari secara presisi dan kontinu sepanjang hari operasi.
3. Mengembangkan sistem kontrol daya adaptif berbasis ESP32 yang mampu mengatur distribusi energi ke beban secara dinamis dalam empat mode

operasi (Surplus, Normal, Hemat, dan Kritis) berdasarkan tegangan terminal baterai LiFePO₄, dengan mekanisme hysteresis $\pm 0,1V$ untuk mencegah ketidakstabilan transisi antar mode.

4. Menerapkan sistem monitoring dan logging berbasis IoT menggunakan platform Blynk untuk pemantauan parameter sistem secara real-time dan Google Sheets untuk pencatatan data otomatis setiap 10 detik, guna mendukung analisis kinerja sistem secara komprehensif.
5. Melakukan pengujian dan analisis kinerja sistem meliputi: peningkatan daya keluaran akibat penerapan solar tracking dual-axis, akurasi posisi tracking panel Perbandingan terhadap single-axis tracking dilakukan secara tidak langsung, akurasi posisi tracking panel, serta respons sistem kontrol daya adaptif terhadap perubahan kondisi tegangan baterai dan variasi beban.
6. Menganalisis efektivitas sistem solar tracking dual-axis pada PLTS off-grid melalui perbandingan energi keluaran terhadap konsumsi daya aktuator sistem tracking (motor stepper NEMA23 dan linear actuator), guna mengevaluasi net energy gain yang dihasilkan oleh implementasi sistem tracking dual-axis.

1.4 Manfaat Tugas Akhir

Berdasarkan tujuan yang telah ditetapkan, penelitian ini memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Bagi pengembangan teknologi energi terbarukan:
Menyediakan model sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) off-grid yang dilengkapi dengan solar tracking dual-axis dan kontrol daya adaptif, sehingga mampu mengoptimalkan distribusi daya.
2. Bagi pengguna sistem energi mandiri:
Mempermudah pengelolaan energi listrik pada sistem off-grid melalui pengaturan daya secara otomatis berdasarkan kondisi baterai dan beban, sehingga penggunaan energi menjadi lebih efisien, stabil, dan aman dari kondisi overdischarge maupun overload.

3. Bagi pengembangan sistem IoT dan kontrol cerdas:

Menjadi acuan dalam integrasi mikrokontroler ESP32, sistem monitoring berbasis IoT, serta algoritma kontrol adaptif dalam satu sistem terpadu yang mampu melakukan pemantauan dan pengendalian secara real-time.

4. Bagi riset dan akademik:

Menambah referensi dalam pengembangan sistem PLTS off-grid skala kecil yang mengintegrasikan aspek mekanik (solar tracking), elektrik (MPPT dan baterai), serta sistem kontrol, sehingga dapat digunakan sebagai dasar untuk penelitian lanjutan di bidang sistem tenaga dan energi terbarukan.

1.5 Pembatasan Masalah

Untuk menjaga agar penelitian tetap terfokus dan sesuai dengan tujuan yang telah ditetapkan, maka ruang lingkup penelitian ini dibatasi sebagai berikut:

1. Skala dan Kapasitas Sistem

Penelitian ini difokuskan pada perancangan dan pengujian prototipe PLTS off-grid berkapasitas 100 Wp dengan sistem penyimpanan energi menggunakan baterai LiFePO₄ 12V 21 Ah. Sistem dirancang untuk melayani beban DC berdaya rendah hingga menengah (≤ 100 W) dalam skala laboratorium, dan tidak mencakup analisis sistem skala besar atau aplikasi komersial.

2. Kondisi Lingkungan Pengujian

Pengujian dilakukan menggunakan cahaya matahari alami pada kondisi lingkungan normal di area terbuka, dengan rentang suhu lingkungan 20–45°C dan intensitas radiasi di atas ± 200 W/m². Penelitian ini tidak mencakup analisis performa pada kondisi ekstrem seperti hujan lebat, angin kencang yang memengaruhi struktur mekanik, maupun pengujian pada kondisi cuaca khusus di luar kondisi normal tropis.

3. Sistem Solar Tracking

Sistem solar tracking yang digunakan adalah dual-axis dengan pendekatan hybrid tiga lapisan, yaitu: perhitungan posisi matahari berbasis waktu RTC DS3231 sebagai referensi posisi utama, koreksi real-time menggunakan empat sensor LDR untuk menyesuaikan kondisi cahaya aktual, serta fine-tuning berbasis algoritma MPPT Perturb and Observe. Aktuasi sumbu azimuth menggunakan motor stepper NEMA23 dengan driver TB6600, dan aktuasi sumbu elevasi menggunakan linear actuator 12V DC. Sistem tidak mencakup metode pelacakan berbasis image processing, GPS, maupun predictive tracking berbasis machine learning.

4. Algoritma Kontrol Daya Adaptif

Sistem kontrol daya adaptif menggunakan metode rule-based control berbasis tegangan terminal baterai LiFePO₄ dengan empat mode operasi (Surplus, Normal, Hemat, Kritis) dan mekanisme hysteresis $\pm 0,1V$. Estimasi State of Charge (SoC) dilakukan secara tidak langsung melalui korelasi tegangan terminal terhadap kurva discharge LiFePO₄. Penelitian ini tidak mencakup penggunaan algoritma kecerdasan buatan seperti fuzzy logic, neural network, maupun machine learning, serta tidak membahas metode estimasi SoC tingkat lanjut seperti Kalman Filter atau Coulomb Counting dengan sensor arus khusus.

5. Sistem Monitoring dan IoT

Monitoring sistem dilakukan menggunakan mikrokontroler ESP32 dengan dua platform pencatatan data: dashboard Blynk IoT untuk pemantauan parameter real-time (diperbarui setiap 60 detik) dan Google Sheets untuk logging data otomatis setiap 10 detik guna keperluan analisis kinerja. Parameter yang dipantau meliputi tegangan, arus, daya, posisi azimuth dan elevasi, suhu, kelembapan, efisiensi MPPT, dan status mode operasi. Penelitian ini tidak mencakup analisis keamanan jaringan, optimasi komunikasi data skala besar, maupun pengujian performa server IoT.

6. Integrasi dengan Sistem Listrik

Sistem PLTS yang dirancang bersifat stand-alone (off-grid) dan tidak terhubung dengan jaringan listrik PLN. Penelitian ini tidak mencakup sistem on-grid, hybrid system, maupun mekanisme sinkronisasi dan ekspor-impor energi listrik.

7. Analisis Kinerja Sistem Analisis kinerja sistem difokuskan pada parameter berikut: optimalisasi daya dan total energi keluaran hasil penerapan sistem *solar tracking dual-axis*, akurasi posisi *tracking* panel (azimuth dan elevasi), efisiensi sistem secara keseluruhan, respons dan kestabilan sistem kontrol daya adaptif terhadap perubahan kondisi baterai, serta *net energy gain* setelah memperhitungkan konsumsi daya aktuator sistem *tracking*. Penelitian ini tidak mencakup analisis ekonomi (*cost-benefit*), perhitungan *Levelized Cost of Energy* (LCOE), maupun studi kelayakan investasi.

1.6 Sistematika Penyusunan Tugas Akhir

Tugas Akhir ini disusun secara sistematis agar pembahasan mudah dipahami dan terarah sesuai dengan tujuan penelitian. Adapun sistematika penulisan laporan Tugas Akhir yang berjudul “RANCANG BANGUN PROTOTIPE PLTS OFF-GRID DENGAN SOLAR TRACKING PANEL DUAL-AXIS DAN SISTEM KONTROL DAYA ADAPTIF BERBASIS ESP32” adalah sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Berisi latar belakang penelitian, rumusan masalah, tujuan, manfaat, pembatasan masalah, serta sistematika penulisan laporan. Bab ini memberikan gambaran umum mengenai arah dan ruang lingkup penelitian.

BAB II LANDASAN TEORI

Berisi teori-teori pendukung dan hasil penelitian terdahulu yang relevan, meliputi konsep dasar PLTS, prinsip kerja solar tracking dual-axis, sistem kontrol daya adaptif, serta pembahasan komponen utama seperti ESP32, sensor, aktuator, dan aplikasi Blynk IoT.

BAB III PERANCANGAN TUGAS AKHIR

Menjelaskan proses perancangan sistem baik perangkat keras maupun perangkat lunak, termasuk blok diagram, flowchart, desain mekanik, rangkaian elektrik, serta implementasi sistem solar tracking dan kontrol daya adaptif berbasis ESP32.

BAB IV IMPLEMENTASI SISTEM

Menjelaskan proses implementasi perangkat keras dan perangkat lunak sistem PLTS off-grid, meliputi pemasangan komponen mekanik (motor NEMA23, linear actuator), instalasi sistem elektronik (ESP32, sensor INA226, LDR, DHT22, RTC DS3231), serta implementasi algoritma solar tracking dan kontrol daya adaptif pada firmware.

BABV PENGUJIAN DAN ANALISA HASIL

Membahas hasil pengujian sistem yang telah diimplementasikan, meliputi pengujian efisiensi solar tracking dual-axis, pengujian kontrol daya adaptif (mode Surplus, Normal, Hemat, Kritis), kestabilan tegangan baterai, serta monitoring IoT. Analisis dilakukan untuk mengevaluasi kinerja dan keandalan sistem secara keseluruhan.

BABVI PENUTUP

Berisi kesimpulan hasil penelitian dan saran untuk pengembangan sistem PLTS off-grid agar lebih efisien dan aplikatif pada skala yang lebih besar.

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN