

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kebutuhan energi listrik pada sektor pertanian semakin meningkat, terutama untuk mendukung penggunaan alat portabel seperti sprayer elektrik, mesin penggiling, serta perangkat komunikasi lapangan. Pada kawasan pertanian terpencil, keterbatasan akses listrik PLN masih menjadi kendala utama sehingga penggunaan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) off-grid menjadi alternatif yang paling memungkinkan. Penelitian oleh Setyawan & Ulinuha, (2022) menunjukkan bahwa PLTS off-grid mampu menyediakan suplai energi stabil untuk peralatan pertanian skala kecil hingga menengah. Hal serupa dibuktikan oleh Prames et al., (2024), di mana penerapan energi surya meningkatkan efisiensi kerja petani karena sumber energi dapat diperoleh secara mandiri.

Namun, performa PLTS off-grid sangat bergantung pada variabilitas iradiasi dan kondisi penyimpanan energi. Tanpa pengaturan yang tepat, sistem dapat mengalami ketidakseimbangan daya sehingga menurunkan umur baterai maupun kestabilan suplai. Bedoud et al., (2022) menekankan bahwa sistem penyimpanan baterai memerlukan strategi kontrol yang mampu menyesuaikan proses charge–discharge berdasarkan kondisi aktual energi. Oleh karena itu, dibutuhkan manajemen energi yang dapat mengatur aliran daya secara adaptif.

Metode kontrol berbasis logika fuzzy telah banyak diterapkan dalam sistem energi terbarukan karena kemampuannya mengolah ketidakpastian tanpa model matematis yang rumit. El Zerk & Ouassaid, (2023) menunjukkan bahwa fuzzy meningkatkan kestabilan operasi PLTS–baterai dan mampu menjaga SoC tetap aman. Sementara itu, studi perbandingan oleh Samavat et al., (2023) mengungkapkan bahwa fuzzy Mamdani lebih stabil untuk kondisi iradiasi yang fluktuatif, sedangkan Sugeno lebih ringan dalam implementasi mikrokontroler. Hal ini relevan karena sistem EMS modern umumnya diintegrasikan dengan mikrokontroler IoT seperti ESP32.

Implementasi mikrokontroler dan teknologi IoT pada sistem PLTS telah terbukti mampu meningkatkan efektivitas pengelolaan energi, terutama dalam menjaga kestabilan suplai daya pada kondisi operasional yang berubah-ubah. Muliawati, (2022) menunjukkan bahwa pengendalian berbasis mikrokontroler pada sistem energi terbarukan mampu mengatur aliran daya secara otomatis sehingga proses pemanfaatan sumber energi menjadi lebih stabil. Temuan tersebut sejalan dengan Sri Paryanto Mursid, (2024) yang berhasil mengembangkan sistem kendali PLTS berbasis IoT untuk memantau tegangan, arus, dan daya secara real-time serta mengatur beban melalui relay otomatis. Hasil-hasil penelitian tersebut mengindikasikan bahwa integrasi mikrokontroler dan IoT merupakan pendekatan yang efektif untuk meningkatkan keandalan sistem PLTS, sehingga relevan untuk diterapkan pada perancangan sistem manajemen energi off-grid untuk beban alat pertanian.

Berdasarkan kebutuhan lapangan serta temuan dari literatur, tugas akhir ini mengembangkan prototipe manajemen energi PLTS *off-grid* untuk *charging station* alat pertanian dengan menerapkan metode fuzzy Mamdani pada mikrokontroler berbasis IoT yang diterapkan pada sistem PLTS berlokasi di Desa Sungai Merdeka, RT 11, Kecamatan Samboja. Prototipe ini diharapkan mampu menjaga kestabilan suplai daya, meningkatkan efisiensi energi, serta melindungi baterai dari proses operasi yang tidak aman.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian pada latar belakang, maka permasalahan yang akan dibahas dalam penelitian tugas akhir ini dapat dirumuskan sebagai berikut:

1. Bagaimana merancang sistem manajemen energi pada PLTS off-grid yang mampu mengatur aliran daya antara panel surya, baterai, dan beban secara otomatis berdasarkan perubahan kondisi operasional sistem?
2. Bagaimana menerapkan Fuzzy Logic Controller (FLC) tipe Mamdani untuk menentukan level beban aktif pada sistem manajemen energi PLTS off-grid, serta menentukan mode operasi berdasarkan selisih daya antara daya PV dan daya beban?

3. Bagaimana kinerja prototipe sistem manajemen energi berbasis logika fuzzy ketika diuji pada variasi kondisi iradiasi dan beban, khususnya dalam menjaga kestabilan State of Charge (SoC) baterai dan kontinuitas suplai daya pada beban sistem?

1.3 Tujuan

Berdasarkan rumusan masalah yang telah dijelaskan sebelumnya, maka tujuan dari penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Mengembangkan prototipe sistem manajemen energi PLTS off-grid yang mampu mengatur aliran daya secara otomatis antara panel surya, baterai, dan beban sesuai dengan kondisi operasional sistem.
2. Mengimplementasikan Fuzzy Logic Controller (FLC) tipe Mamdani sebagai pengendali utama dalam menentukan level beban aktif pada sistem manajemen energi PLTS off-grid.
3. Menguji dan mengevaluasi kinerja prototipe sistem manajemen energi berbasis logika fuzzy berdasarkan kestabilan State of Charge (SoC) baterai serta kontinuitas suplai daya pada beban sistem.

1.4 Batasan Rancangan

Adapun batasan rancangan pada penelitian tugas akhir ini agar pengembangan prototipe tetap terarah, adalah sebagai berikut:

1. Penelitian dibatasi pada perancangan dan implementasi prototipe Energy Management System (EMS) untuk PLTS off-grid, tanpa melibatkan integrasi dengan jaringan PLN maupun sumber energi tambahan lainnya.
2. Perangkat kendali yang digunakan adalah mikrokontroler ESP32, sehingga proses akuisisi data, estimasi State of Charge (SoC), eksekusi logika fuzzy, dan pengendalian beban disesuaikan dengan kemampuan mikrokontroler tersebut.
3. Metode pengambilan keputusan dibatasi pada Fuzzy Logic Controller (FLC) tipe Mamdani dengan tiga variabel input, yaitu State of Charge (SoC), daya keluaran panel surya (Ppv), dan daya beban total (Pbeban).
4. Nilai State of Charge (SoC) yang digunakan merupakan nilai estimasi menggunakan metode Coulomb Counting hybrid berbasis tegangan, sehingga

hasilnya bergantung pada pembacaan tegangan, arus baterai, kapasitas baterai, dan kondisi awal SoC.

5. Mode operasi sistem ditentukan berdasarkan selisih daya antara daya PV dan daya beban, sehingga mode operasi tidak menjadi output dari Fuzzy Logic Controller.
6. Sensor yang digunakan meliputi PZEM-017 untuk pengukuran parameter DC pada sisi panel surya dan baterai, PZEM-004T untuk pengukuran parameter AC pada sisi beban, serta DS18B20 untuk pemantauan suhu baterai.
7. Sensor arus pada sisi baterai (PZEM-017) bersifat satu arah (*one-way*), yaitu hanya membaca besar (magnitudo) arus tanpa mendeteksi arah aliran arus, karena pengukuran dilakukan melalui *shunt resistor* yang tidak membedakan kondisi pengisian (*charge*) maupun pengosongan (*discharge*), sehingga penentuan arah arus pada estimasi *State of Charge* (SoC) dibantu melalui pembacaan tegangan baterai.
8. Sistem tidak mencakup perancangan Maximum Power Point Tracking (MPPT) maupun optimasi pembangkitan energi panel surya.
9. Web monitoring yang digunakan pada penelitian ini tidak menjadi fokus utama tugas akhir, melainkan hanya digunakan sebagai media pemantauan data hasil pembacaan sensor secara real-time.
10. Pengujian difokuskan pada kemampuan prototipe dalam membaca parameter sistem, mengestimasi SoC, menjalankan logika fuzzy, serta mengatur beban berdasarkan kondisi energi yang tersedia pada sistem PLTS off-grid.

1.5 Manfaat

Adapun manfaat dari sistem manajemen energi pada PLTS off-grid baik secara akademik, teknis maupun praktis, sebagai berikut:

1.5.1 Manfaat Akademik

Manfaat akademik dari Tugas Akhir ini meliputi:

1. Memberikan contoh penerapan metode logika fuzzy pada sistem energi terbarukan, sehingga dapat menjadi referensi bagi mahasiswa atau peneliti dalam studi terkait sistem kendali berbasis kecerdasan komputasional.

2. Menyediakan studi kasus implementasi Fuzzy Logic Controller tipe Mamdani pada mikrokontroler ESP32 dalam sistem manajemen energi PLTS off-grid, khususnya untuk pengambilan keputusan level beban aktif dan pengaturan beban secara real-time.
3. Menjadi materi pendukung dalam pengajaran mata kuliah sistem kendali, energi terbarukan, dan mikrokontroler, karena prototipe yang dibangun menunjukkan integrasi antara teori kendali dan implementasi perangkat keras.

1.5.2 Manfaat Teknis

Manfaat teknis yang dihasilkan antara lain:

1. Menghadirkan rancangan sistem manajemen energi yang mampu mengatur aliran daya secara otomatis berdasarkan kondisi panel surya, baterai, dan beban, sehingga dapat dijadikan acuan dalam pembuatan sistem PLTS skala kecil.
2. Memberikan contoh implementasi modul sensor daya, sensor arus, dan sensor tegangan untuk pemantauan parameter listrik secara real-time pada sistem off-grid.
3. Menghasilkan prototipe prioritas beban berbasis mikrokontroler yang dapat diterapkan pada sistem energi lain yang memerlukan pembagian beban adaptif ketika suplai energi terbatas.

1.5.3 Manfaat Praktis

Manfaat praktis dari pengembangan prototipe ini meliputi:

1. Mendukung penggunaan perangkat pertanian di daerah tanpa jaringan listrik, melalui penyediaan sistem manajemen energi yang stabil untuk charging station alat portabel.
2. Dapat dimanfaatkan oleh kelompok tani atau UMKM sebagai solusi energi mandiri yang mudah dioperasikan dan tidak membutuhkan infrastruktur listrik yang kompleks.
3. Berpotensi digunakan sebagai dasar pengembangan produk atau layanan energi portabel, yang dapat diterapkan untuk kebutuhan lapangan seperti monitoring lokasi, penerangan, atau pengisian perangkat kerja.

1.6 Potensi Dampak Fungsional/Komersial

Pengembangan prototipe sistem manajemen energi pada PLTS off-grid ini memiliki potensi dampak fungsional dan komersial sebagai berikut:

1.6.1 Potensi Dampak Fungsional

Adapun dampak fungsional dari pengembangan sistem manajemen energi pada PLTS off-grid ini, sebagai berikut:

1. Meningkatkan kestabilan suplai energi pada sistem PLTS off-grid, sehingga peralatan pertanian tetap dapat digunakan meskipun terjadi perubahan iradiasi dan beban.
2. Memperpanjang umur baterai melalui pengaturan charge–discharge yang lebih terkontrol berdasarkan kondisi SoC dan daya yang tersedia.
3. Mengurangi gangguan operasional di lapangan, karena sistem mampu menentukan prioritas beban secara otomatis ketika energi terbatas.
4. Mendukung pemanfaatan energi terbarukan secara lebih efisien, melalui pengambilan keputusan yang adaptif berbasis logika fuzzy.
5. Mempermudah proses pemantauan energi karena seluruh parameter listrik dibaca dan dievaluasi secara real-time oleh mikrokontroler.

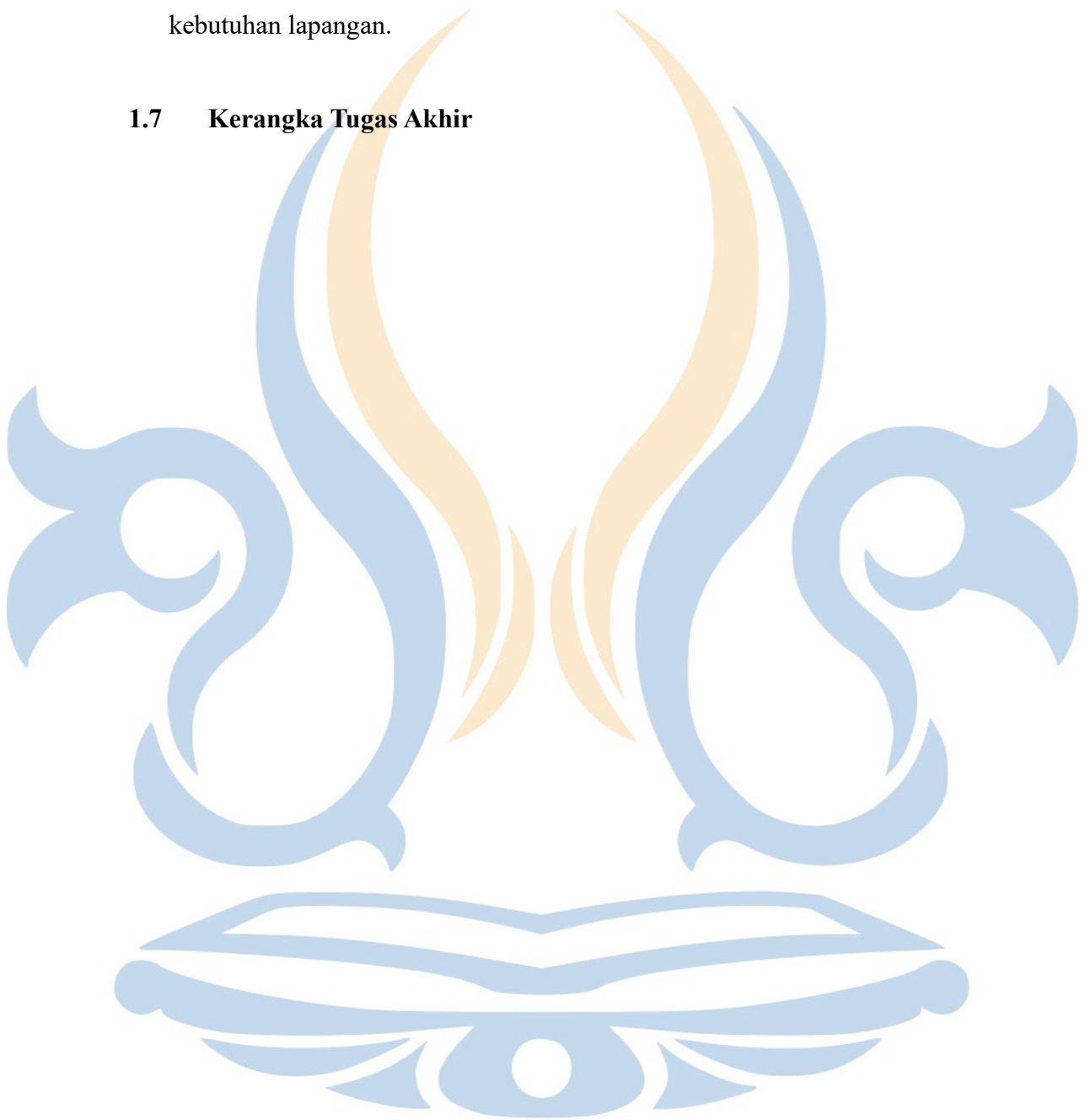
1.6.2 Potensi Dampak Komersial

Adapun dampak komersial dari pengembangan sistem manajemen energi pada PLTS off-grid ini, sebagai berikut:

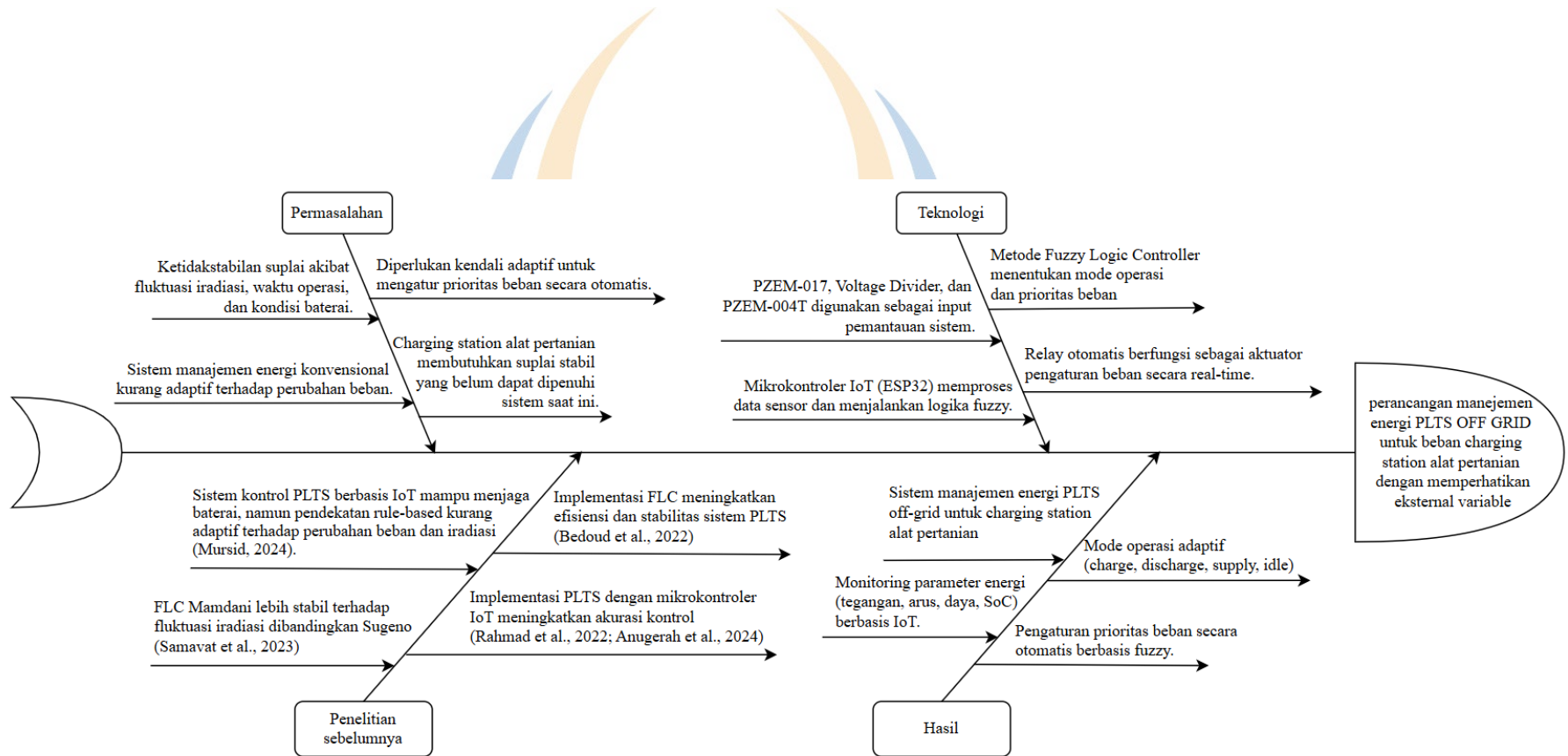
1. Berpotensi dikembangkan menjadi produk manajemen energi skala kecil, yang dapat digunakan pada charging station portabel, sistem PLTS rumahan, atau kebutuhan UMKM pertanian.
2. Memiliki peluang untuk diproduksi dengan biaya relatif rendah, karena menggunakan komponen yang mudah didapat seperti ESP32, sensor arus, sensor tegangan, dan modul daya.
3. Dapat menjadi dasar pengembangan layanan monitoring energi berbasis IoT, yang memungkinkan integrasi menuju dashboard komersial atau paket solusi energi mandiri.
4. Relevan sebagai produk untuk wilayah tanpa jaringan listrik, seperti kebun, ladang terpencil, usaha tani, wisata alam, dan fasilitas layanan publik kecil.

5. Berpotensi menarik minat kelompok tani atau UMKM, karena memberikan kombinasi antara energi terbarukan, otomasi, dan keandalan sistem yang sesuai kebutuhan lapangan.

1.7 Kerangka Tugas Akhir



INSTITUT TEKNOLOGI
KALIMANTAN



Gambar 1. 1 Kerangka tugas akhir (Fishbone)