

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Tanaman jagung (*Zea mays* L.) merupakan komoditas pangan strategis yang menempati posisi kedua setelah padi dalam struktur ketahanan pangan nasional Indonesia[21].. Sebagai tanaman yang memiliki siklus pertumbuhan relatif singkat namun sangat sensitif terhadap ketersediaan air, jagung membutuhkan manajemen penyiraman yang presisi agar potensi hasil panennya dapat tercapai secara optimal. Dalam kondisi ideal, kebutuhan air tanaman jagung dipenuhi berdasarkan kondisi aktual kelembaban tanah pada tanaman perakaran, bukan berdasarkan jadwal tetap yang tidak mempertimbangkan variabilitas kondisi lingkungan. Sistem Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) dan standar agronomi modern menetapkan bahwa penyiraman presisi yang berbasis data sensor lingkungan secara *real-time* merupakan pendekatan yang paling efisien dalam penggunaan sumber daya air untuk budidaya tanaman pangan [21]. Pendekatan ini memungkinkan setiap tanaman menerima jumlah air yang tepat sesuai kebutuhannya, sehingga tidak terjadi pemborosan air akibat penyiraman berlebih maupun stres air akibat penyiraman yang kurang.

Kenyataan di lapangan menunjukkan bahwa sebagian besar petani jagung di Indonesia, termasuk di wilayah kepulauan Kepulauan Riau, masih mengandalkan metode penyiraman konvensional berbasis jadwal tetap yang tidak responsif terhadap kondisi aktual lingkungan [1]. Metode ini mengabaikan variabilitas spasial kondisi tanah, di mana dalam satu petak lahan yang relatif kecil sekalipun, tanaman yang berdekatan dapat memiliki tingkat kelembaban tanah yang berbeda akibat variasi drainase mikro, paparan sinar matahari, atau perbedaan karakteristik tanah setempat. Di sisi lain, adopsi teknologi IoT yang telah mulai berkembang dalam sektor pertanian pun belum sepenuhnya menyelesaikan permasalahan ini, karena sebagian besar sistem IoT yang diterapkan masih menggunakan kendali biner (*threshold-based*) yang hanya memutuskan kondisi menyiram (ON) atau tidak menyiram (OFF), tanpa kemampuan menentukan jumlah air yang proporsional

terhadap tingkat kebutuhan aktual tanaman [2]. Permasalahan ini menjadi lebih kompleks di wilayah kepulauan seperti Kepulauan Riau, yang memiliki karakteristik ketersediaan air tanah terbatas, infrastruktur penyiraman yang belum optimal, serta keterbatasan pasokan dan keandalan energi listrik dibandingkan wilayah daratan [6]. Kondisi-kondisi tersebut menjadikan inefisiensi penggunaan air dan energi bukan sekadar kerugian ekonomi bagi petani, melainkan permasalahan struktural yang berdampak langsung pada keberlanjutan produktivitas pertanian di wilayah kepulauan.

Penelitian-penelitian terdahulu yang mengintegrasikan logika fuzzy dan IoT untuk sistem penyiraman cerdas telah menunjukkan peningkatan yang signifikan dibandingkan metode konvensional, namun mayoritas masih menyisakan beberapa kesenjangan yang belum terjawab. Pertama, sebagian besar sistem yang dikembangkan masih menerapkan kendali global, yakni satu keputusan penyiraman yang sama untuk seluruh area lahan, sehingga tidak mampu menangani variabilitas spasial kondisi tanah pada tingkat per-tanaman [1]. Kedua, sistem yang menghasilkan keluaran durasi penyiraman kontinu (bukan sekadar ON/OFF) umumnya masih menggunakan dua variabel masukan, yaitu kelembaban tanah dan suhu udara, tanpa mempertimbangkan kelembaban udara yang secara agronomis memengaruhi laju evapotranspirasi secara signifikan [9]. Ketiga, sebagian besar sistem penyiraman berbasis IoT yang ada masih bergantung pada aktuator bertekanan pompa yang membutuhkan daya listrik kontinu selama penyiraman berlangsung, sehingga kurang sesuai untuk diterapkan di wilayah dengan keterbatasan dan ketidakstabilan pasokan energi seperti wilayah kepulauan [21]. Keempat, sistem yang sepenuhnya bergantung pada konektivitas *cloud* untuk pengambilan keputusan berisiko mengalami kegagalan fungsi ketika koneksi internet terputus, suatu kondisi yang umum terjadi di wilayah kepulauan dengan infrastruktur jaringan yang tidak merata [4].

Beberapa penelitian relevan telah dilakukan untuk mengatasi sebagian dari kesenjangan tersebut. Ardyanti dkk. mengimplementasikan Fuzzy Mamdani dengan dua variabel input (kelembaban tanah dan suhu udara) untuk sistem penyiraman otomatis, dan membuktikan efektivitas metode ini pada

mikrokontroler, namun keluarannya masih bersifat biner [1]. Muttaqi dkk. memperluas pendekatan tersebut hingga menghasilkan sinyal respons yang lebih optimal dengan tingkat akurasi 91,6%, namun belum menerapkan kendali multi-tanaman independen [2]. Arief dkk. berhasil mengimplementasikan Fuzzy Mamdani untuk menghasilkan durasi penyiraman yang kontinu dan presisi pada sistem *greenhouse* berbasis Blynk IoT, yang menjadi salah satu model acuan metodologis dalam penelitian ini [5]. Saputri dkk. menerapkan Fuzzy Mamdani dengan dua variabel input pada tanaman *Vitis vinifera* dan membuktikan efektivitasnya untuk sistem penyiraman presisi, meski hanya untuk satu tanaman tunggal [9]. Benyezza dkk. mengembangkan sistem penyiraman tanaman berbasis kendali fuzzy dan IoT yang menunjukkan potensi penghematan air dan energi melalui pembagian lahan menjadi beberapa tanaman kendali independen, namun belum mengintegrasikan arsitektur *edge computing* untuk keandalan sistem saat koneksi terputus [21]. Penelitian terdahulu tersebut secara kolektif menunjukkan bahwa belum ada sistem tunggal yang mengintegrasikan kendali fuzzy multi-output dengan tiga variabel masukan, arsitektur *edge computing* mandiri, dan mekanisme aktuasi hemat energi berbasis gravitasi secara bersamaan.

Berdasarkan kesenjangan dan kajian penelitian terdahulu yang diuraikan di atas, penelitian ini mengusulkan Sistem Kendali Penyiraman Presisi Zonal Tanaman Jagung Berbasis IoT *Edge Computing* Menggunakan Logika Fuzzy Mamdani sebagai solusi yang menjawab keempat kesenjangan yang teridentifikasi secara terintegrasi. Sistem ini menerapkan kendali multi-output dengan 3 sensor kelembaban tanah dan lima katup solenoid yang masing-masing beroperasi secara independen, sehingga setiap tanaman menerima durasi penyiraman yang disesuaikan dengan kondisi kelembaban tanahnya sendiri, bukan berdasarkan keputusan global yang seragam [6]. Mesin inferensi Logika Fuzzy Mamdani yang diimplementasikan menggunakan tiga variabel masukan, yaitu kelembaban tanah, suhu udara, dan kelembaban udara, dengan basis aturan lengkap 64 kombinasi ($4 \times 4 \times 4$), sehingga keputusan durasi penyiraman yang dihasilkan lebih komprehensif dalam menangkap dinamika lingkungan mikro dibandingkan sistem dua variabel yang ada sebelumnya [3]. Seluruh proses komputasi fuzzy dijalankan secara lokal pada mikrokontroler ESP32 sebagai *edge device*, sehingga sistem tetap

beroperasi secara cerdas dan mandiri meskipun koneksi ke platform pemantauan *cloud* (Blynk) terputus sementara, menjawab tantangan ketidakstabilan infrastruktur jaringan di wilayah kepulauan [4]. Mekanisme distribusi air dirancang menggunakan prinsip aliran gravitasi dari tandon tanpa pompa bertekanan, sehingga konsumsi energi listrik diminimalkan hanya pada komponen katup solenoid selama proses aktuasi, menjadikan sistem ini lebih sesuai untuk konteks wilayah kepulauan dengan keterbatasan dan ketidakstabilan pasokan energi [21]. Kontribusi penelitian ini terletak pada integrasi keempat aspek tersebut, yaitu kendali fuzzy multi-output tiga variabel, arsitektur *edge computing* mandiri, dan mekanisme aktuasi gravitasi hemat energi, dalam satu sistem yang kohesif dan divalidasi melalui pengujian akurasi algoritma berbasis *Root Mean Square Error* (RMSE) serta pengujian fungsional purwarupa di lapangan KWT Srikandi Jaya, Tanjungpinang, Kepulauan Riau.

B. Perumusan Masalah

Bagaimana merancang arsitektur IoT Edge Computing dan membangun mesin inferensi logika Fuzzy Mamdani 3 variabel untuk kendali penyiraman zonal, serta seberapa efektif sistem tersebut?

C. Batasan Penelitian

Untuk memfokuskan penelitian, batasan masalah yang ditetapkan adalah sebagai berikut.

1. Input kendali terdiri atas lima sensor kelembaban tanah yang masing-masing dianggap sebagai input independen zonal, satu sensor suhu udara, dan satu sensor kelembaban udara yang keduanya dianggap sebagai input global yang berlaku untuk seluruh zona.
2. Metode kecerdasan buatan yang digunakan adalah Logika Fuzzy Mamdani dengan metode defuzzifikasi *Centroid of Area* (CoA) yang dihitung secara diskrit.

3. Basis aturan (*rule base*) yang digunakan terdiri atas 64 aturan IF-THEN, mencakup seluruh kombinasi dari tiga variabel input dengan masing-masing empat himpunan fuzzy ($4 \times 4 \times 4$).
4. Aktuator kendali menggunakan 5 unit katup solenoid yang beroperasi secara independen (zonal) dengan sumber aliran murni mengandalkan gaya gravitasi tandon air tanpa pompa. Oleh karena itu, debit keluaran air diasumsikan bernilai konstan (berdasarkan kalibrasi awal saat tandon penuh) dan sistem tidak memperhitungkan fluktuasi penurunan debit akibat perubahan tekanan hidrostatik.
5. Platform *edge computing* menggunakan ESP32, sementara platform *cloud monitoring* menggunakan Blynk.
6. Objek penelitian adalah tanaman jagung dengan sistem penyiraman, difokuskan pada studi kasus lima titik atau batang tanaman pada lahan KWT Srikandi Jaya, Tanjungpinang.
7. Pengujian tingkat akurasi dan persentase kesalahan (*error*) sistem dibatasi pada komparasi hasil komputasi mikrokontroler (ESP32) terhadap hasil simulasi teoritis pada perangkat lunak MATLAB, yang dievaluasi menggunakan parameter *Root Mean Square Error* (RMSE).

D. Tujuan Penelitian

1. Mengembangkan sistem IoT zonal menggunakan ESP32 yang mampu mengintegrasikan data multi-sensor dan mengendalikan lima titik penyiraman secara terpisah melalui katup solenoid berbasis gravitasi.
2. Menyusun *fuzzy logic engine* dengan basis aturan 64 kombinasi yang dapat menghitung durasi penyiraman secara adaptif bagi masing-masing tanaman jagung berdasarkan kondisi kelembaban tanah, suhu udara, dan kelembaban udara.
3. Memvalidasi performa sistem Logika Fuzzy Mamdani melalui pengujian akurasi menggunakan metode *Root Mean Square Error* (RMSE) terhadap data uji yang merepresentasikan variasi kondisi lingkungan di lapangan.

E. Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut.

1. Bagi Bidang Informatika Menghasilkan model implementasi *edge computing* dan sistem kendali cerdas terdistribusi (*fuzzy Mamdani multi-output virtual*) sebagai solusi inovatif dalam aplikasi *smart farming*, khususnya pada konteks penerapan di wilayah dengan keterbatasan infrastruktur jaringan dan energi.
2. Bagi Petani dan Sektor Agrikultur Menyediakan purwarupa sistem penyiraman otomatis berbasis gravitasi yang berpotensi efisien dalam penggunaan air dan energi listrik, serta mampu memelihara kondisi kelembaban tanah pada tingkat optimal secara spesifik per tanaman, sehingga berpotensi meningkatkan kualitas dan kuantitas hasil panen jagung.
3. Bagi Pengembangan Ilmu Pengetahuan Memberikan kontribusi berupa data empiris mengenai performa dan akurasi Logika Fuzzy Mamdani dengan basis aturan yang menyeluruh (64 kombinasi) ketika diterapkan pada permasalahan kendali penyiraman skala mikro-tanaman pada komoditas pangan di wilayah kepulauan.