

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Krisis air global dan perubahan iklim telah menempatkan sektor pertanian pada posisi yang semakin rentan. Saat ini, sektor pertanian mengonsumsi lebih dari 70% sumber daya air tawar dunia, namun pengelolaannya masih sering dilakukan secara tidak efisien (Ingrao et al., 2023). Proyeksi iklim menunjukkan bahwa kenaikan suhu global sebesar 1,5°C hingga 3°C berpotensi memperburuk risiko kelangkaan air (*green water scarcity*) secara signifikan pada lahan pertanian, baik tadah hujan maupun beririgasi (Rosa and He, 2025). Di Indonesia, dampak ini telah dirasakan nyata melalui perubahan pola curah hujan yang mengganggu ketersediaan irigasi, seperti yang terjadi pada Daerah Aliran Sungai (DAS) Cimanuk, yang mengancam keberlanjutan produksi pangan nasional (Heryani et al., 2022). Oleh karena itu, modernisasi sistem irigasi pertanian menjadi suatu keharusan, sejalan dengan agenda *Sustainable Development Goals* (SDGs), khususnya tujuan ke-6 mengenai efisiensi air dan tujuan ke-2 mengenai pertanian berkelanjutan (Tirtalistyani, Murtiningrum and Kanwar, 2022).

Sebagai respons, teknologi *Internet of Things* (IoT) telah banyak diadopsi dalam konsep *Smart Agriculture*. Berbagai tinjauan literatur menunjukkan bahwa integrasi sensor IoT mampu memantau kondisi lingkungan lahan secara *real-time* dan presisi, sehingga menggantikan metode manual yang cenderung lambat dan kurang akurat (Kumar et al., 2024). Selain itu, penerapan sistem kendali irigasi berbasis *embedded systems* terbukti lebih efektif dalam pengelolaan air dibandingkan

metode irigasi terjadwal konvensional (Morchid et al., 2025). Namun demikian, sebagian besar sistem IoT yang telah dikembangkan masih bersifat reaktif, yaitu hanya merespons kondisi tanah yang telah mengalami kekeringan, tanpa memiliki kemampuan untuk memprediksi kebutuhan air di masa depan.

Untuk meningkatkan kecerdasan dan efektivitas sistem irigasi, algoritma *Machine Learning* (ML) mulai diterapkan secara luas sebagai alat pendukung pengambilan keputusan. Salah satu metode yang dominan adalah *Random Forest* (RF), yang memiliki keunggulan dalam hal ketahanan (*robustness*) terhadap *noise* dan stabilitas prediksi pada dataset lingkungan (Chen et al., 2025). Namun, RF memiliki kelemahan fundamental karena memperlakukan setiap pengamatan sebagai data independen, sehingga kurang optimal dalam menangkap ketergantungan waktu jangka panjang (*long-term dependencies*) dari data yang bersifat runtun waktu (*time-series*). Sebagai solusi alternatif, metode *Deep Learning* seperti *Long Short-Term Memory* (LSTM) dirancang khusus dengan mekanisme gerbang memori untuk memodelkan dinamika temporal dan terbukti unggul dalam memprediksi fluktuasi kelembapan tanah di lapangan (Bakhshian et al., 2025). Meskipun demikian, efektivitas model-model prediksi tersebut, baik RF maupun LSTM, sangat bergantung pada kelengkapan variabel input lingkungan yang digunakan untuk merepresentasikan kondisi fisik lahan yang sebenarnya.

Di sisi lain, parameter lingkungan yang digunakan dalam model prediksi kelembapan tanah sering kali belum bersifat komprehensif. Banyak penelitian masih berfokus pada variabel suhu dan kelembapan udara, sementara radiasi matahari merupakan faktor pendorong utama dalam proses evapotranspirasi, yaitu

hilangnya air dari tanah dan tanaman. Beberapa studi menunjukkan bahwa tingkat akurasi estimasi evapotranspirasi sangat bergantung pada kualitas dan representasi data radiasi matahari yang digunakan (Mitrowska, Kleniewska and Kuchar, 2025). Mengingat keterbatasan sensor radiasi tingkat industri pada sistem berbiaya rendah, variabel intensitas cahaya (*illuminance*) dapat digunakan sebagai pendekatan (*proxy*) sederhana untuk merepresentasikan pola radiasi matahari yang memengaruhi laju pengeringan tanah. Pengabaian variabel ini, khususnya di wilayah tropis dengan tingkat penyinaran tinggi seperti Indonesia, berpotensi menyebabkan bias yang signifikan dalam estimasi laju deplesi kelembapan tanah.

Perkembangan teknologi terkini dalam bidang pertanian juga mengarah pada penerapan konsep *Digital Twin*. Berbeda dengan model simulasi statis, *Digital Twin* dalam pertanian didefinisikan sebagai representasi virtual dari sistem fisik yang terus diperbarui secara *real-time* untuk mendukung pengambilan keputusan yang lebih adaptif dan presisi (Purcell and Neubauer, 2023). Meskipun konsep ini menawarkan potensi besar, masih terdapat kesenjangan penelitian (*research gap*) yang signifikan. Pertama, masih terbatas penelitian yang secara eksplisit mengintegrasikan variabel intensitas cahaya ke dalam model prediksi berbasis *Digital Twin* untuk sistem irigasi presisi skala mikro. Kedua, kajian komparatif yang mengevaluasi apakah peningkatan kompleksitas komputasi pada model *Deep Learning* seperti LSTM memberikan keuntungan akurasi yang sepadan dibandingkan model yang lebih ringan seperti *Random Forest* ketika diimplementasikan dalam arsitektur komputasi terdistribusi IoT (*Cloud-Edge*) masih relatif minim.

Berdasarkan kesenjangan tersebut, penelitian ini mengusulkan pengembangan sistem *Adaptive Digital Twin* berbasis arsitektur *Cloud-Edge* IoT untuk prediksi kelembapan tanah dengan mengintegrasikan parameter intensitas cahaya. Penelitian ini akan mengevaluasi kinerja *Random Forest* sebagai *baseline* dan *Long Short-Term Memory* (LSTM) sebagai representasi *Deep Learning*, guna menentukan algoritma paling optimal dalam membangun sistem irigasi presisi yang adaptif dan efisien.

1.2 Rumusan Masalah

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

1. Bagaimana merancang arsitektur sistem *Adaptive Digital Twin* berbasis arsitektur *Cloud-Edge* IoT yang mengintegrasikan data intensitas cahaya untuk pemantauan irigasi presisi?
2. Bagaimana perbandingan kinerja (*performance*) antara algoritma *Random Forest* dan *Long Short-Term Memory* (LSTM) dalam memprediksi kelembapan tanah berdasarkan data lingkungan *time-series*?
3. Seberapa efektif implementasi model terbaik dalam mekanisme kontrol irigasi adaptif untuk menjaga kelembapan tanah sesuai rentang kelembapan tanah yang ditetapkan berdasarkan literatur?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai dari penelitian ini adalah:

1. Mengembangkan purwarupa (*prototype*) sistem *Adaptive Digital Twin* berbasis *Cloud-Edge* yang mampu mengakuisisi data lingkungan (suhu,

kelembapan udara, kelembapan tanah, dan intensitas cahaya) secara *real-time*.

2. Menganalisis dan membandingkan akurasi model *Random Forest* dan LSTM menggunakan metrik evaluasi *Root Mean Square Error* (RMSE), *Mean Absolute Error* (MAE), dan Koefisien Determinasi (R^2) untuk menentukan algoritma prediksi terbaik.
3. Mengintegrasikan model prediksi terpilih ke dalam mekanisme kendali otomatis guna mengevaluasi efisiensi penggunaan air.

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat baik secara teoritis maupun praktis:

1.4.1 Manfaat Teoritis

- a. Memberikan kontribusi ilmiah mengenai implementasi arsitektur terdistribusi *Adaptive Digital Twin* berbasis *Machine Learning* pada sistem IoT berbiaya rendah.
- b. Memperkaya literatur mengenai pengaruh variabel intensitas cahaya matahari sebagai variabel prediktor dalam model *Deep Learning* untuk kelembapan tanah.

1.4.2 Manfaat Praktis

- a. Menyediakan solusi sistem irigasi cerdas yang adaptif dan terjangkau bagi petani skala mikro dalam menghadapi fluktuasi iklim.
- b. Mendukung upaya konservasi sumber daya air di sektor pertanian sesuai dengan target SDGs.

1.5 Batasan Masalah

Agar penelitian ini lebih terarah dan fokus, maka ditetapkan batasan masalah sebagai berikut:

1. Objek Tanaman: Pengujian dilakukan pada tanaman Cabai Rawit (*Capsicum frutescens*) sebagai studi kasus dalam media tanam pot (skala mikro), bukan lahan pertanian terbuka yang luas.
2. Variabel Prediksi: Sistem difokuskan untuk memprediksi nilai kelembapan tanah (*soil moisture*) jangka pendek (*short-term forecast*). Prediksi didasarkan pada data lingkungan saat ini dan data historis (*lag features*), tanpa memperhitungkan variabel nutrisi tanah atau serangan hama.