

- Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

LAPORAN DISERTASI

MODEL *HYBRID DEEP LEARNING* UNTUK ESTIMASI NILAI REFERENSI EVAPOTRANSPIRASI (ET_0) PADA SISTEM IRIGASI CERDAS

ABDUL HARIS



**PROGRAM STUDI DOKTOR ILMU KOMPUTER
SEKOLAH SAINS DATA, MATEMATIKA DAN INFORMATIKA
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2025**



PERNYATAAN MENGENAI DISERTASI DAN SUMBER INFORMASI SERTA PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa disertasi dengan judul “Model *Hybrid Deep Learning* untuk Estimasi Nilai Referensi Evapotranspirasi (ET_o) pada Sistem Irigasi Cerdas” adalah karya saya dengan arahan dari dosen pembimbing dan belum diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka di bagian akhir disertasi ini.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya kepada Institut Pertanian Bogor.

Bogor, Desember 2025

Abdul Haris
G661194151

RINGKASAN

ABDUL HARIS. Model *Hybrid Deep Learning* Untuk Estimasi Nilai Referensi Evapotranspirasi (ETo) Pada Sistem Irigasi Cerdas. Dibimbing oleh MARIMIN, SRI WAHJUNI dan BUDI INDRA SETIAWAN.

Nilai referensi evapotranspirasi (ETo) merupakan parameter kunci dalam sistem pengelolaan irigasi pertanian yang efisien dan tepat guna. ETo menggambarkan besarnya kebutuhan air yang hilang ke atmosfer melalui proses gabungan antara evaporasi dari permukaan tanah dan transpirasi oleh tanaman. Informasi ini sangat krusial dalam menentukan waktu dan jumlah air yang ideal untuk disalurkan ke lahan pertanian. Ketepatan dalam penjadwalan irigasi berdasarkan ETo berperan penting dalam menyesuaikan pasokan air dengan kebutuhan fisiologis tanaman serta kondisi lahan aktual sehingga dapat menghindari pemborosan air akibat *over-irrigation* maupun kekurangan air akibat *under-irrigation*. Efisiensi ini menjadi semakin penting dalam menghadapi keterbatasan sumber daya air dan tuntutan peningkatan produktivitas pertanian yang berkelanjutan.

Pada penelitian ini peneliti mengusulkan pendekatan penyelesaian sistem irigasi menggunakan model arsitektur terbaru untuk menentukan waktu irigasi yang tepat dan optimal, beberapa penelitian sebelumnya telah dilakukan oleh beberapa peneliti yang telah dikaji melalui *literatur review* dapat diketahui bahwa penelitian dengan model komputasi yang digunakan untuk sistem irigasi cerdas mulai dari sistem otomasi berbasis pengatur waktu sederhana (*timer-based control*) sampai model sistem irigasi dengan pemanfaatan model komputasi canggih berbasis kecerdasan buatan telah dilakukan. Salah satu pendekatan yang cukup populer adalah penggunaan *Deep Learning*, yang menawarkan fleksibilitas dalam pengambilan keputusan yang dinamis berdasarkan data. Salah satunya adalah *Long Short-Term Memory* (LSTM) yang menurut hasil literatur sekitar 22% dari studi yang dikaji memanfaatkan pendekatan *deep learning* dalam konteks irigasi cerdas. Namun, sebagian besar penelitian tersebut tidak menjelaskan arsitektur model yang digunakan secara eksplisit. Dari total tersebut hanya sekitar 7% penelitian yang secara jelas menerapkan arsitektur LSTM yang dirancang untuk menangani data sekuensial seperti parameter cuaca harian. Sementara itu, sekitar 18% lainnya mengembangkan model hybrid yang menggabungkan *deep learning* dengan metode optimasi atau teknik *ensemble learning*. Sisanya, sekitar 3%, hanya menerapkan model komputasi secara umum tanpa fokus khusus pada aplikasi distribusi air irigasi. Selain pendekatan berbasis model prediktif, pengembangan sistem irigasi cerdas juga banyak melibatkan teknologi *Internet of Things* (IoT) sebagai tulang punggung infrastruktur sensor dan aktuator. Berbagai sistem telah dikembangkan menggunakan antarmuka digital berbasis Android atau platform web, yang memungkinkan pemantauan suhu, kelembaban tanah, dan parameter lingkungan lainnya secara *real-time*. Namun, sebagian besar dari sistem tersebut masih tergolong sistem otomasi yang hanya menjalankan perintah berdasarkan input sensor langsung dan belum masuk dalam kategori sistem cerdas yang mampu beradaptasi, belajar, serta memprediksi kebutuhan air berdasarkan kondisi lingkungan yang dinamis.

Penelitian ini mengusulkan sebuah arsitektur model komputasi berbasis deep learning, yaitu *Hybrid Convolutional Long Short-Term Memory* (H-ConvLSTM), yang dirancang untuk meningkatkan akurasi dan adaptivitas dalam estimasi nilai referensi evapotranspirasi. Model ini memadukan keunggulan *Convolutional Neural Network* (CNN) dalam mengekstraksi fitur spasial dan LSTM dalam menangani data temporal sekuensial, seperti tren suhu dan kelembaban harian. Inovasi dan keunggulan utama pada arsitektur yang di usulkan ini terletak pada penggunaan *Decision Tree Pooling* (DT-Pool) yang digunakan untuk menggantikan metode pooling konvensional seperti *max pooling* atau *average pooling*.

Secara konseptual, permasalahan utama pada *pooling* konvensional adalah hilangnya informasi penting akibat proses reduksi nilai yang hanya mempertimbangkan satu kriteria, misalnya nilai maksimum atau rata-rata. Pendekatan tersebut memang efektif untuk penyederhanaan dimensi data, tetapi tidak mampu menyesuaikan diri terhadap variasi pola input yang kompleks dan non-linier. Untuk mengatasi masalah ini, digunakan *Decision Tree Pooling* yang memanfaatkan mekanisme *decision boundary* dan *information gain* dalam menentukan nilai representatif dari setiap proses konvolusi. Proses *pooling* ini dilakukan secara adaptif dengan menentukan nilai ambang (*threshold*) yang optimal berdasarkan distribusi nilai piksel atau fitur pada setiap jendela konvolusi. Proses ini melibatkan perhitungan *entropy* dan pemilihan atribut dengan *gain* tertinggi sebagai dasar keputusan, sehingga fitur yang dianggap paling relevan terhadap konteks spasial maupun temporal tetap dipertahankan.

Kebaruan penelitian ini memiliki dua aspek utama yakni pertama diusulkan arsitektur *deep learning* baru H-ConvLSTM yang digunakan untuk prediksi nilai referensi evapotranspirasi (ET_o) dengan melakukan modifikasi pada tahap *pooling* menggunakan *Decision Tree Pooling* (DT-Pool). Pendekatan ini memungkinkan proses ekstraksi fitur yang lebih adaptif dalam mempertahankan informasi penting dibandingkan metode *pooling* konvensional seperti *max pooling* dan *average pooling*. Kedua penelitian ini berhasil mengurangi ketergantungan terhadap radiasi matahari sebagai parameter utama yang digunakan untuk prediksi nilai referensi ET_o dan hanya memanfaatkan temperatur udara dan kelembaban relatif sebagai parameter untuk melakukan prediksi sehingga lebih aplikatif pada kondisi dengan keterbatasan sensor. Hasil pengujian menunjukkan bahwa model H-ConvLSTM dengan *Decision Tree Pooling* menghasilkan nilai error terendah sebesar 0,1187 dan koefisien determinasi R^2 mencapai 0,8942 mengungguli model CNN dan LSTM konvensional. Temuan ini menegaskan efektivitas pendekatan yang diusulkan dalam menghasilkan model yang presisi, adaptif dan berpotensi diterapkan pada sistem irigasi cerdas diberbagai wilayah khususnya wilayah tropis.

Kata kunci: *Deep Learning, Decision Tree Pooling, Evapotranspiration, Hargreaves*, Irigasi Cerdas

- Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
 2. Dilarang menggunakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

SUMMARY

ABDUL HARIS. Hybrid Deep Learning Model for Estimating Reference Evapotranspiration (ET_o) in Smart Irrigation Systems. Supervised by MARIMIN, SRI WAHJUNI, and BUDI INDRA SETIAWAN.

The reference evapotranspiration value (ET_o) is a key parameter in an efficient and effective agricultural irrigation management system. ET_o represents the amount of water lost to the atmosphere through the combined processes of soil surface evaporation and plant transpiration. This information is crucial for determining the ideal timing and volume of water to be delivered to agricultural land. The accuracy of irrigation scheduling based on ET_o plays an essential role in aligning water supply with the physiological needs of crops and the actual conditions of the field, thereby preventing water waste due to over-irrigation and avoiding crop stress caused by under-irrigation. Such efficiency becomes increasingly important in the context of limited water resources and the growing demand for sustainable agricultural productivity.

In this study, the researchers propose a novel architectural model approach for optimizing and determining the precise timing of irrigation within smart irrigation systems. A review of prior studies reveals that various computational models have been explored for irrigation management ranging from simple automation systems based on timer-controlled mechanisms (timer-based control) to more advanced computational frameworks leveraging artificial intelligence. One of the most prominent approaches among these is Deep Learning, which offers dynamic and data-driven decision-making capabilities. Among the existing architectures, the Long Short-Term Memory (LSTM) model stands out as one of the most frequently applied methods, with approximately 22% of the reviewed studies utilizing deep learning techniques in the context of smart irrigation. However, the majority of these studies do not explicitly describe the network architecture used. Of the total, only about 7% explicitly employ the LSTM architecture specifically designed to process sequential data such as daily weather parameters. Meanwhile, around 18% of the studies develop hybrid models that integrate deep learning with optimization algorithms or ensemble learning techniques, while the remaining 3% apply computational models in a more general sense, without specific focus on water distribution control in irrigation systems. Beyond predictive modeling approaches, the development of smart irrigation systems has also heavily incorporated Internet of Things (IoT) technology as the backbone for sensor and actuator infrastructure. Various implementations have been developed using Android-based digital interfaces or web platforms that enable real-time monitoring of temperature, soil moisture, and other environmental parameters. However, most of these systems still fall within the category of automation systems that merely execute commands based on direct sensor input and have not yet evolved into intelligent systems capable of adapting, learning, and predicting water requirements dynamically according to changing environmental conditions.



This study proposes a computational model architecture based on deep learning, namely the Hybrid Convolutional Long Short-Term Memory (H-ConvLSTM), which is designed to enhance both accuracy and adaptability in estimating reference evapotranspiration (ET_o) values. The model integrates the strengths of the Convolutional Neural Network (CNN) for spatial feature extraction and the Long Short-Term Memory (LSTM) network for handling sequential temporal data, such as daily temperature and humidity trends. The primary innovation and advantage of the proposed architecture lie in the incorporation of Decision Tree Pooling (DT-Pooling), which replaces conventional pooling methods such as max pooling or average pooling, enabling more adaptive and information-preserving feature selection within the convolutional process.

Conceptually, the main issue with conventional pooling lies in the loss of important information due to the reduction process that relies on a single criterion, such as selecting only the maximum or average value. While this approach is effective for dimensionality reduction, it lacks adaptability to complex and non-linear input patterns. To address this limitation, Decision Tree Pooling (DT-Pooling) is introduced, utilizing decision boundary and information gain mechanisms to determine the most representative value from each convolutional operation. This pooling process is conducted adaptively by establishing an optimal threshold based on the distribution of pixel or feature values within each convolutional window. The procedure involves entropy calculation and the selection of attributes with the highest information gain as the decision basis, ensuring that features most relevant to both spatial and temporal contexts are preserved throughout the learning process.

The novelty of this study comprises two main aspects. First, a new deep learning architecture, namely H-ConvLSTM, is proposed for predicting reference evapotranspiration (ET_o) by introducing a modification at the pooling stage using Decision Tree Pooling (DT-Pool). This approach enables a more adaptive feature extraction process that preserves important information more effectively than conventional pooling methods such as max pooling and average pooling. Second, this study successfully reduces the dependence on solar radiation as the primary parameter for predicting reference evapotranspiration by utilizing only air temperature and relative humidity as input variables. This makes the proposed approach more applicable in environments with limited sensor availability. Experimental results demonstrate that the H-ConvLSTM model with Decision Tree Pooling achieves the lowest prediction error of 0.1187 and a coefficient of determination (R^2) of 0.8942, outperforming conventional CNN and LSTM models. These findings confirm the effectiveness of the proposed approach in producing a precise and adaptive model with strong potential for implementation in smart irrigation systems, particularly in tropical regions.

Keywords: Deep Learning, Decision Tree Pooling, Evapotranspiration, Hargreaves, Smart Irrigation.

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

© Hak Cipta milik IPB, tahun 2025
Hak Cipta dilindungi Undang-Undang

Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan atau menyebutkan sumbernya. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik, atau tinjauan suatu masalah, dan pengutipan tersebut tidak merugikan kepentingan IPB.

Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apa pun tanpa izin IPB.

MODEL *HYBRID DEEP LEARNING* UNTUK ESTIMASI NILAI REFERENSI EVAPOTRANSPIRASI (ET₀) PADA SISTEM IRIGASI CERDAS

ABDUL HARIS

Disertasi
sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
Doktor pada
Program Studi Ilmu Komputer

**PROGRAM STUDI DOKTOR ILMU KOMPUTER
SEKOLAH SAINS DATA, MATEMATIKA DAN INFORMATIKA
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2025**



@Hak cipta milik IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

Penguji Luar Komisi Pembimbing pada Ujian Tertutup Disertasi:

- 1 Prof. Dr. Ir. Agus Bueno, M.Si., M.Kom
- 2 Ardiansyah, S.TP., M. Si., Ph.D

Promotor Luar Komisi Pembimbing pada Sidang Promosi Terbuka Disertasi:

- 1 Prof. Dr. Ir. Agus Bueno, M.Si., M.Kom
- 2 Ardiansyah, S.TP., M. Si., Ph.D

Judul Disertasi: Model *Hybrid Deep Learning* Untuk Estimasi Nilai Referensi
Evapotranspirasi (ETo) Pada Sistem Irigasi Cerdas

Nama : Abdul Haris
NIM : G661194151

@Hak cipta milik IPB University

Disetujui oleh

Pembimbing 1:
Prof. Dr. Ir. Marimin, M. Sc.



Pembimbing 2:
Dr. Ir. Sri Wahjuni, MT



Pembimbing 3:
Prof. Dr. Ir. Budi Indra Setiawan, M. Agr.



Diketahui oleh

Ketua Program Studi:
Prof. Dr. Imas Sukaesih Sitanggang, S. Si, M. Kom
NIP 19750130 199802 2 001



Dekan Sekolah Sains Data, Matematika dan Informatika:
Prof. Dr. Ir. Agus Bueno, M. Si, M. Kom
NIP 19660702 199302 1 001



Tanggal Ujian: 18 September 2025

Tanggal Lulus:

PRAKATA

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah subhanaahu wa ta'ala atas segala karunia-Nya sehingga karya ilmiah ini berhasil diselesaikan. Tema yang dipilih dalam penelitian yang dilaksanakan sejak bulan Juni 2022 sampai bulan Juni 2025 ini, dengan judul “Model *Hybrid Deep Learning* untuk Estimasi Nilai Referensi Evapotranspirasi (ETo) Pada Sistem Irigasi Cerdas”.

Terima kasih penulis ucapkan kepada para pembimbing, Prof. Dr. Ir Marimin, M.Sc, Dr. Ir Sri Wahjuni, M.T dan Prof. Dr. Ir Budi Indra Setiawan, M.Agr yang telah membimbing dan banyak memberi saran. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada Prof. Dr. Ir. Agus Bueno, M. Si, M. Kom dan Ardiansyah, S.TP., M. Si., Ph.D selaku penguji luar komisi pembimbing serta Prof. Dr. Anang Kurnia, S.Si., M.S selaku moderator pada sidang tertutup dan Prof. Dr. Ir. Endar Hasafah Nugrahani, M.S selaku moderator pada sidang promosi. Terima kasih juga yang setinggi-tingginya kami sampai kepada Prof. Dr. Imas Sukaesih Sitanggang, S.Si., M.Sc. selaku Ketua Program Studi dan seluruh pengelola Program S3 Ilmu Komputer SSMI IPB yang telah banyak membantu sampai disertasi ini diselesaikan dengan baik. Di samping itu, penghargaan penulis sampaikan kepada seluruh teman-teman peneliti dan staf dan Laboratorium Irigasi Wisma Wageningen yang telah membantu selama pengumpulan data. Ungkapan terima kasih juga disampaikan kepada Ayah, Ibu, Adik-adik, Istri dan anak-anak saya Aulia Rizqia K. Putri dan Alya Adreena S. Katulanis serta seluruh keluarga yang telah memberikan dukungan, doa dan kasih sayangnya sehingga penelitian disertasi ini dapat terselesaikan dengan baik.

Semoga karya ilmiah ini bermanfaat bagi pihak yang membutuhkan dan bagi kemajuan ilmu pengetahuan.

Bogor, Desember 2025

Abdul Haris



DAFTAR ISI

DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR LAMPIRAN	xiii
DAFTAR ISTILAH	xiv
PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	7
1.3 Tujuan	7
1.4 Manfaat	8
1.5 Ruang Lingkup	8
1.6 Kebaruan (<i>novelty</i>)	8
II TINJAUAN PUSTAKA	10
2.1 <i>Deep Learning</i>	10
2.2 <i>Arsitektur Hybrid Deep Learning</i>	12
2.3 Penerapan <i>Hybrid Deep Learning</i> di bidang Irigasi	15
2.4 <i>Internet of Things</i>	19
2.5 <i>Arsitektur Internet of Things</i>	20
2.6 Sistem Irigasi Cerdas	23
2.7 Estimasi Nilai Referensi Evapotranspirasi dengan ANN	28
2.8 <i>Deep Learning</i> untuk Estimasi Nilai Referensi Evapotranspirasi	33
2.9 Dasar Teori Evapotranspirasi	35
2.10 Modul Prototipe untuk Sistem Irigasi	38
2.11 Dasar Teori Irigasi Cerdas	40
2.12 Model Hargreaves	41
2.13 Teknik Evaluasi Model	42
2.14 Keterkaitan dengan Penelitian Terdahulu	46
III METODOLOGI	54
3.1 Tahapan Penelitian	54
3.2 Waktu dan Tempat Penelitian	57
3.3 Alat dan Bahan	58
3.4 Prosedur Kerja	58
3.5 Metode Pengumpulan Data	63
3.6 Teknik Pengolahan Data	65
3.7 Estimasi Evapotranspirasi dengan <i>Artificial Neural Network</i> (ANN)	65
3.8 Estimasi Nilai Referensi Evapotranspirasi dengan H-ConvLSTM	69
3.9 Prototype Modul Irigasi Cerdas	78
IV HASIL PENELITIAN	83
4.1 Estimasi Evapotranspirasi dengan Menggunakan ANN	84
4.2 Estimasi Evapotranspirasi Menggunakan H-ConvLSTM	89
4.3 Analisa Kompleksitas Waktu H-ConvLSTM	94
4.4 Modul Sistem Irigasi Cerdas	95
V PEMBAHASAN UMUM	100

- Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

5.1	Model Perbandingan <i>Artificial Neural Networks</i>	100
5.2	Pengembangan Arsitektur <i>Deep Learning</i>	100
5.3	Pengembangan Modul Sistem Irigasi Cerdas	102
5.4	Asumsi Penelitian	103
5.5	Keterbatasan Penelitian	104
5.6	Dampak Teknologi Terhadap Peningkatan Produktivitas Tanaman	104
5.7	Implikasi/Dampak Penelitian	106
VI	SIMPULAN DAN SARAN	108
6.1	Simpulan	108
6.2	Saran	109
	DAFTAR PUSTAKA	110
	LAMPIRAN	118
	RIWAYAT HIDUP	122