

**MODEL PENGENDALIAN CERDAS PADA IRIGASI BAWAH PERMUKAAN
MENGUNAKAN ALGORITMA PEMBELAJARAN MANDIRI
*HYBRID RF-FUZZY-PID DENGAN ADAPTIVE GAIN TUNING***

BADIE UDDIN



**PROGRAM STUDI DOKTOR ILMU KOMPUTER
SEKOLAH SAINS DATA, MATEMATIKA, DAN INFORMATIKA
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2026**

PERNYATAAN MENGENAI DISERTASI DAN SUMBER INFORMASI SERTA PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa disertasi dengan judul “Model Pengendalian Cerdas pada Irigasi Bawah Permukaan Menggunakan Algoritma Pembelajaran Mandiri *Hybrid RF-Fuzzy-PID* dengan *Adaptive Gain Tuning*” 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, Juni 2026

Badie Uddin
G661194011

RINGKASAN

BADIE UDDIN. Model Pengendalian Cerdas pada Irigasi Bawah Permukaan Menggunakan Algoritma Pembelajaran Mandiri *Hybrid RF–Fuzzy–PID* dengan Adaptive Gain Tuning. *Intelligent Control Model for Subsurface Irrigation Using Hybrid Self-Learning Algorithm RF–Fuzzy–PID with Adaptive Gain Tuning*. Dibimbing oleh MARIMIN, SRI WAHJUNI dan BUDI INDRA SETIAWAN.

Pengelolaan irigasi yang efisien dan adaptif merupakan salah satu tantangan utama dalam sistem pertanian modern, khususnya di tengah meningkatnya tekanan terhadap ketersediaan sumber daya air dan ketidakpastian kondisi iklim. Sistem irigasi konvensional umumnya masih mengandalkan strategi pengendalian klasik, seperti *Proportional Integral Derivative* (PID) dan variasinya, termasuk *Fuzzy-PID*. Meskipun pendekatan ini telah digunakan secara luas karena struktur yang sederhana dan kemudahan implementasinya, pengendali tersebut memiliki keterbatasan mendasar, terutama karena penggunaan parameter penguatan (*gain*) yang bersifat tetap. Dalam lingkungan pertanian nyata, karakteristik sistem yang dikendalikan khususnya dinamika kelembapan tanah bersifat sangat nonlinier, dipengaruhi oleh variasi tekstur tanah, kapasitas lapang, laju infiltrasi, serta perubahan evapotranspirasi yang dinamis akibat fluktuasi cuaca harian. Kondisi ini menyebabkan pengendali dengan parameter statis menjadi kurang responsif dan tidak mampu mempertahankan kinerja optimal secara konsisten.

Keterbatasan tersebut semakin nyata ketika sistem irigasi dihadapkan pada perubahan lingkungan yang cepat dan tidak terduga, seperti peningkatan suhu, variasi radiasi matahari, perubahan kelembapan udara, serta pola hujan yang tidak menentu. Dalam situasi seperti ini, pengendali PID klasik sering kali menghasilkan *overshoot* yang besar, waktu pemantapan (*settling time*) yang lama, dan kesalahan keadaan tunak (*steady-state error*) yang signifikan. Meskipun *Fuzzy-PID* menawarkan fleksibilitas yang lebih baik melalui aturan linguistik, pendekatan ini umumnya masih mengandalkan basis aturan dan parameter yang dirancang secara manual, sehingga adaptabilitasnya tetap terbatas ketika dihadapkan pada kondisi lingkungan yang sangat dinamis. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan pengendalian yang tidak hanya adaptif, tetapi juga mampu belajar secara mandiri dari data lingkungan untuk meningkatkan presisi dan efisiensi penggunaan air.

Menjawab tantangan tersebut, penelitian ini mengusulkan sebuah arsitektur pengendali *Hybrid RF–Fuzzy–PID* berbasis pembelajaran mandiri (*self-learning*). Arsitektur ini dirancang untuk mengintegrasikan keunggulan algoritma pembelajaran mesin dengan fleksibilitas kontrol *fuzzy* adaptif dalam satu kerangka sistem pengendalian yang terpadu. Pada lapisan pertama, algoritma *Random Forest* (RF) digunakan sebagai model prediksi untuk memperkirakan kebutuhan air tanaman secara harian. RF dipilih karena kemampuannya dalam menangani hubungan nonlinier yang kompleks, ketahanannya terhadap *noise data*, serta performanya yang stabil dalam regresi berbasis data lingkungan multivariat. Data masukan bagi model RF diperoleh dari *Automatic Weather Station* (AWS), yang mencakup parameter-parameter iklim penting seperti suhu udara, kelembapan relatif, radiasi matahari, dan evapotranspirasi. Dengan memanfaatkan data ini, RF

mampu menghasilkan estimasi kebutuhan air yang lebih akurat dan kontekstual terhadap kondisi lingkungan aktual.

Pada lapisan adaptasi, pengendali *fuzzy* menggunakan masukan *error* $e(t) = \theta_{sp} - \theta(t)$ dan perubahan *error* $de(t)$ yang dinormalisasi pada rentang $[-1,1]$ dengan parameter $e_{max} = 0,10$ dan $de_{max} = 0,05$ asis aturan *fuzzy* 5×5 menghasilkan ΔK_p , ΔK_i , dan ΔK_d (total 75 aturan) untuk melakukan *gain scheduling* pada PID. Pengendali PID bekerja pada *setpoint* kelembapan tanah $\theta_{sp} = 0,35$ dengan pembatasan debit irigasi 0–10 mm/hari, serta dilengkapi mekanisme anti-windup back-calculation dengan koefisien $K_{aw} = 0,2$ untuk menjaga stabilitas pada kondisi saturasi aktuator. Evaluasi sistem dilakukan pada horizon 120 hari dengan langkah waktu $\Delta t = 0,1$ hari menggunakan data AWS aktual, sehingga menghasilkan siklus kendali *close-loop* yang responsif terhadap dinamika lingkungan.

Hasil prediksi kebutuhan air dari *Random Forest* selanjutnya digunakan sebagai sinyal *feedforward* dalam sistem pengendali. Pendekatan *feedforward* ini memberikan keuntungan signifikan karena memungkinkan sistem untuk mengantisipasi perubahan kebutuhan air sebelum terjadi deviasi kelembapan tanah yang besar. Dengan demikian, pengendali tidak hanya bereaksi terhadap kesalahan (*error*) yang telah terjadi, tetapi juga bersifat proaktif dalam menyesuaikan suplai air. Integrasi sinyal *feedforward* berbasis prediksi ini menjadi salah satu aspek kunci yang membedakan arsitektur yang diusulkan dari pendekatan pengendalian konvensional. Model *Random Forest* menunjukkan nilai R^2 sebesar 0,89 saat diuji dengan data pengujian, dengan MAPE sebesar 8,3% dan RMSE sebesar 0,42 mm/hari. Selisih antara data pelatihan dan pengujian tergolong kecil, yang menunjukkan bahwa model ini stabil dan tidak terjebak dalam *overfitting*. Tingkat akurasi ini memadai untuk berfungsi sebagai sinyal *feedforward* karena tingkat kesalahan prediksi masih berada dalam batas toleransi dinamika kelembapan tanah.

Hasil rancangan sistem menunjukkan bahwa integrasi prediksi berbasis data (RF) dan hasil pemodelan kendali adaptif (*Fuzzy-PID*) mampu meningkatkan responsivitas sistem serta menjaga kelembapan tanah lebih stabil pada kondisi cuaca yang berfluktuasi. Peningkatan responsivitas ini terlihat dari berkurangnya waktu *settling* sebanyak 32% jika dibandingkan dengan sistem kontrol PID standar, serta pengurangan *overshoot* kelembapan tanah hingga 28%, yang memungkinkan fluktuasi kadar air tanah dijaga dalam batas toleransi $\pm 3\%$ dari *setpoint*. Di samping itu, nilai *error* dalam keadaan stabil menurun dari 5,4% pada sistem PID tradisional menjadi 2,1% pada sistem *hybrid RF-Fuzzy-PID*, yang mengindikasikan adanya perbaikan stabilitas kontrol saat menghadapi variasi cuaca. Selain meningkatkan efisiensi penggunaan air, sistem ini berpotensi meningkatkan produktivitas air (*water productivity*) melalui pengurangan pemborosan air irigasi, serta memberikan manfaat sosial-ekonomi berupa pengurangan intensitas monitoring manual, penurunan kebutuhan tenaga kerja lapangan, pengurangan *labour cost*, dan efisiensi biaya operasional irigasi (*operational cost*) melalui otomatisasi pengaturan debit berbasis data.

Kata kunci: efisiensi tenaga kerja; evapotranspirasi; *Fuzzy adaptive control*; kelembapan tanah; produktivitas air; PID; *Random Forest*

SUMMARY

BADIE UDDIN. Intelligent Control Model for Subsurface Irrigation Using Hybrid Self-Learning Algorithm RF-*Fuzzy*-PID with Adaptive Gain Tuning. Supervised by MARIMIN, SRI WAHJUNI and BUDI INDRA SETIAWAN.

Efficient and adaptive irrigation management is one of the main challenges in modern agricultural systems, particularly amid increasing pressure on water resource availability and uncertainty in climatic conditions. Conventional irrigation systems generally still rely on classical control strategies, such as Proportional–Integral–Derivative (PID) and its variants, including *Fuzzy*–PID. Although these approaches have been widely used due to their simple structure and ease of implementation, they have fundamental limitations, mainly because they employ fixed *gain* parameters. In real agricultural environments, the characteristics of the controlled system—especially soil moisture dynamics—are highly nonlinear and influenced by variations in soil texture, field capacity, infiltration rate, and dynamically changing evapotranspiration due to daily weather fluctuations. These conditions cause controllers with static parameters to become less responsive and unable to consistently maintain optimal performance.

These limitations become even more evident when irrigation systems face rapid and unpredictable environmental changes, such as rising temperature, variations in solar radiation, changes in air humidity, and irregular rainfall patterns. Under such circumstances, classical PID controllers often result in large *overshoot*, long settling time, and significant steady-state *error*. Although *Fuzzy*–PID provides better flexibility through linguistic rules, this approach still commonly relies on manually designed rule bases and parameters, thereby limiting its adaptability when confronted with highly dynamic environmental conditions. Therefore, a control approach is needed that is not only adaptive but also capable of learning autonomously from environmental data to improve the precision and efficiency of water use.

To address these challenges, this study proposes a self-learning *Hybrid RF–Fuzzy–PID* controller architecture. This architecture is designed to integrate the advantages of machine learning algorithms with the flexibility of adaptive *fuzzy* control within a unified control framework. In the first layer, the *Random Forest* (RF) algorithm is employed as a predictive model to estimate daily crop water requirements. RF is selected due to its ability to handle complex nonlinear relationships, its robustness to data noise, and its stable performance in multivariate environmental data regression. Input data for the RF model are obtained from an Automatic Weather Station (AWS), which includes key climatic parameters such as air temperature, relative humidity, solar radiation, and evapotranspiration. By leveraging these data, RF is able to produce more accurate and context-aware estimates of water requirements under actual environmental conditions.

At the adaptation layer, the *fuzzy* controller uses the *error* input $e(t) = \theta_{sp} - \theta(t)$ and the change of *error* $de(t)$, normalized within the range $[-1,1]$ with parameters $e_{max} = 0,10$ and $de_{max} = 0,05$. A 5×5 *fuzzy* rule base generates

ΔK_p , ΔK_i , and ΔK_d , (a total of 75 rules) to perform *gain scheduling* for the PID controller. The PID controller operates at a soil moisture *setpoint* of $\theta_{sp}=0,35$ with an irrigation discharge constraint of 0–10 mm/day and is equipped with an anti-windup back-calculation mechanism with coefficient $K_{aw} = 0,2$ to maintain stability under actuator saturation. System evaluation is conducted over a 120-day horizon with a time step of $\Delta t=0,1$ day using actual AWS data, resulting in a closed-loop control cycle that is responsive to environmental dynamics.

The predicted water demand from the Random Forest is then used as a feedforward signal in the control system. This feedforward approach offers significant advantages because it allows the system to anticipate changes in water demand before large deviations in soil moisture occur. Thus, the controller not only reacts to errors that have occurred but also proactively adjusts the water supply. The integration of prediction-based feedforward signals is one of the key aspects that distinguishes the proposed architecture from conventional control approaches. The Random Forest model showed an R^2 value of 0.89 when tested with the testing data, with a MAPE of 8.3% and an RMSE of 0.42 mm/day. The difference between the training and testing data is relatively small, indicating that the model is stable and not overfitted. This level of accuracy is sufficient to function as a feedforward signal because the prediction error rate is still within the soil moisture dynamics tolerance limits.

The system design results show that the integration of data-driven prediction (RF) and adaptive control modeling (*Fuzzy*–PID) can improve system responsiveness and maintain soil moisture more stably under fluctuating weather conditions. This increased responsiveness is indicated by a 32% reduction in settling time compared to a standard PID control system, as well as a 28% reduction in soil moisture *overshoot*, allowing soil water content fluctuations to be kept within a $\pm 3\%$ tolerance of the setpoint. In addition, the *steady-state error* decreased from 5.4% in the traditional PID system to 2.1% in the hybrid RF–*Fuzzy*–PID system, indicating improved control stability when facing weather variations. In addition to improving water use efficiency, this system has the potential to increase water productivity through the reduction of irrigation water wastage, as well as provide socio-economic benefits such as reduced manual monitoring intensity, decreased field labor requirements, lower labor costs, and operational cost efficiency in irrigation through data-based flow regulation automation.

Keywords: *adaptive fuzzy control*; evapotranspiration; labor efficiency; PID; *Random Forest*; soil moisture; water productivity

**MODEL PENGENDALIAN CERDAS PADA IRIGASI BAWAH PERMUKAAN
MENGUNAKAN ALGORITMA PEMBELAJARAN MANDIRI
*HYBRID RF-FUZZY-PID DENGAN ADAPTIVE GAIN TUNING***

BADIE UDDIN

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

**PROGRAM STUDI DOKTOR ILMU KOMPUTER
SEKOLAH SAINS DATA, MATEMATIKA DAN INFORMATIKA
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2026**

Penguji Luar Komisi Pembimbing pada Ujian Tertutup Disertasi:

1. Dr. Toto Haryanto, S. Kom., M.Si.
2. Ardiansyah, S.TP., M.Si., Ph.D.

Promotor Luar Komisi Pembimbing pada Sidang Promosi Terbuka Disertasi:

1. Dr. Toto Haryanto, S. Kom., M.Si.
2. Ardiansyah, S.TP., M.Si., Ph.D.

Judul Disertasi : Model Pengendalian Cerdas Pada Irigasi Bawah Permukaan
Menggunakan Algoritma Pembelajaran Mandiri *Hybrid RF–
Fuzzy–PID* dengan *Adaptive Gain Tuning*
Nama : Badie Uddin
NIM : G661194011

Disetujui oleh

Pembimbing 1:

Prof. Dr. Ir. Marimin, M.Sc.

Pembimbing 2:

Dr. Ir. Sri Wahjuni, M.T.

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 Buono, M.Si., M. Kom.
NIP 19660702 199302 1 001

Tanggal Ujian:
10 Februari 2026

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 Januari 2023 sampai bulan Januari 2026, dengan judul “Model Pengendalian Cerdas Pada Irigasi Bawah Permukaan Menggunakan Algoritma Pembelajaran Mandiri *Hybrid RF-Fuzzy-PID* dengan *Adaptive Gain Tuning*”.

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 moderator seminar, dan penguji luar komisi pembimbing. Di samping itu, penghargaan penulis sampaikan kepada Prof. Dr. Ir. Budi Indra Setiawan, M.Agr. yang telah memberi izin penelitian beserta staf Laboratorium Terpadu Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan yang telah membantu selama pengumpulan data. Ungkapan terima kasih juga disampaikan kepada istri, anak-anak dan adik yang telah memberikan dukungan, doa, dan kasih sayangnya, kesabaran dan pengertiannya.

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

Bogor, Juni 2026

Badie Uddin

DAFTAR ISI

DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR LAMPIRAN	xiv
DAFTAR ISTILAH	xv
DAFTAR SINGKATAN	xvii
I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan	3
1.4 Manfaat	4
1.5 Ruang Lingkup	4
1.6 Kebaruan (<i>Novelty</i>)	5
II TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Sistem Irigasi	6
2.2 <i>Smart Control</i>	8
2.3 <i>Internet of Things</i>	10
2.4 <i>Rdaftaandom Forest</i>	11
2.5 <i>Fuzzy Logic</i>	13
2.6 <i>Proporsional, Integral, Derivatif (PID)</i>	14
2.7 Analisis Data	15
2.8 Penelitian Terdahulu	15
III METODE	21
3.1 Pendekatan Penelitian	21
3.2 Deskripsi Umum	22
3.3 Tahapan Penelitian	25
IV HASIL DAN PEMBAHASAN	57
4.1 Deskripsi Sistem dan Lingkungan Eksperimen	57
4.2 Hasil Simulasi Model PID	57
4.3 Hasil Simulasi Model RF-PID	58
4.4 Hasil Simulasi Model <i>RF-Fuzzy-PID</i>	65
4.5 Perbandingan Sistem Kontrol dan Kinerja Sistem Kontrol PID, RF-PID, dan <i>RF-Fuzzy-PID</i>	70
4.6 Analisis Estimasi Penghematan Air Irigasi	75
4.7 Rekomendasi Paket Teknologi Implementasi	75
4.8 Asumsi dan Keterbatasan Penelitian	77
V SIMPULAN UMUM DAN SARAN	79
DAFTAR PUSTAKA	81
LAMPIRAN	85
RIWAYAT HIDUP	150