

SIMULASI SISTEM *MONITORING* LENGAS TANAH BERBASIS ADC DAN KENDALI IRIGASI OTOMATIS MENGGUNAKAN METODE *HYSTERESIS* UNTUK APLIKASI PERTANIAN PRESISI

Simulation of an ADC-Based Soil Moisture Monitoring and Hysteresis-Controlled Automatic Irrigation System for Precision Agriculture

Ardan Wiratmoko^{1*}, Andri Prima Nugroho¹, Murtiningrum¹, Gigieh Henggar Jaya², Saifuddin Afif¹, Mukhes Sri Muna³, Agapetalia Indriyawati⁴, Lilik Sutiarmo¹

¹ Smart Agriculture Research Center, Departemen Teknik Pertanian dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, Universitas Gadjah Mada, Jl. Flora No. 1, Bulaksumur, Yogyakarta 55281, Indonesia. ardan.w@ugm.ac.id

² Program Studi Teknik Pertanian, Fakultas Pertanian, Universitas Jenderal Soedirman, Purwokerto, Jawa Tengah, Indonesia. gigieh.jaya@unsoed.ac.id

³ Departemen Teknik Pertanian dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, Universitas Udayana, Bali 80361, Indonesia. mukhessrimuna@unud.ac.id

⁴ Program Studi Teknik Biosistem, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sumatera, Jl. Terusan Ryacudu, Way Hui, Lampung Selatan 35365, Indonesia. agapetalia.Indriyawati@tbs.itera.ac.id

*) Penulis korespondensi

Diterima 30 April 2026; Disetujui 18 Mei 2026

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan mensimulasikan sistem monitoring lengas tanah berbasis *Analog to Digital Converter* (ADC) dan kendali irigasi otomatis menggunakan metode hysteresis untuk aplikasi pertanian presisi. Model simulasi dikembangkan secara komputasional menggunakan Python dengan merepresentasikan alur akuisisi sinyal sensor, penambahan noise, pengondisian sinyal menggunakan filter RC *low-pass*, konversi analog-ke-digital, estimasi *Volumetric Water Content* (VWC), serta keputusan aktuasi pompa. Sensor lengas tanah dimodelkan menghasilkan tegangan 0,50–2,50 V yang merepresentasikan 0–60% VWC. Hasil simulasi menunjukkan bahwa ADC 12 bit dengan tegangan referensi 3,30 V menghasilkan resolusi 0,8059 mV/count dan estimasi resolusi lengas tanah sebesar 0,0242% VWC/count. Frekuensi sampling 20,00 Hz memenuhi kriteria Nyquist, sedangkan filter RC mampu menurunkan RMSE dari 197,06 mV menjadi 68,18 mV. Kendali *hysteresis* dengan ambang ON pada VWC<25% dan OFF pada VWC>38% menghasilkan respons pompa yang stabil dengan duty cycle 15,28% selama simulasi 72 jam. Simulasi ini menunjukkan bahwa integrasi ADC, pengondisian sinyal, dan hysteresis berpotensi menjadi dasar pengembangan sistem irigasi presisi berbasis monitoring lengas tanah.

Kata kunci: ADC, *hysteresis*, irigasi otomatis, lengas tanah, pertanian presisi

ABSTRACT

This study aimed to simulate an Analog to Digital Converter (ADC)-based soil moisture monitoring system and hysteresis-controlled automatic irrigation for precision agriculture applications. The computational model was developed using Python to

represent the signal acquisition workflow, including sensor signal generation, noise addition, RC low-pass signal conditioning, analog-to-digital conversion, volumetric water content (VWC) estimation, and pump actuation decisions. The soil moisture sensor was modeled to produce an analog voltage of 0.50–2.50 V representing 0–60% VWC. The simulation results showed that a 12-bit ADC with a 3.30 V reference voltage provided a resolution of 0.8059 mV/count and an estimated soil moisture resolution of 0.0242% VWC/count. The 20.00 Hz sampling frequency satisfied the Nyquist criterion, while the RC filter reduced RMSE from 197.06 mV to 68.18 mV. The hysteresis controller, with an ON threshold at VWC<25% and an OFF threshold at VWC>38%, produced stable pump operation with a duty cycle of 15.28% during the 72-hour simulation. These findings indicate that integrating ADC characteristics, signal conditioning, and hysteresis control provides a practical basis for developing soil-moisture-driven precision irrigation systems.

Keywords: ADC, automatic irrigation, hysteresis, precision agriculture, soil moisture

PENDAHULUAN

Ketersediaan air tanah merupakan faktor penting dalam mendukung pertumbuhan tanaman dan efisiensi penggunaan air pada sistem pertanian (Zhang et al., 2024). Pada praktik budidaya konvensional, keputusan irigasi masih sering dilakukan berdasarkan jadwal tetap atau pengamatan visual, sehingga berpotensi menyebabkan pemberian air yang tidak sesuai dengan kondisi aktual media tanam. Kondisi tersebut dapat menimbulkan dua permasalahan utama, yaitu kekurangan air yang menghambat pertumbuhan tanaman atau kelebihan air yang menurunkan efisiensi irigasi. Oleh karena itu, sistem *monitoring* lengas tanah diperlukan untuk menyediakan informasi kuantitatif sebagai dasar pengambilan keputusan irigasi yang lebih tepat (Nugroho et al., 2023; Sreeram et al., 2026; Wiratmoko et al., 2023).

Perkembangan pertanian presisi mendorong penggunaan sensor, microcontroller, dan sistem kendali otomatis untuk meningkatkan efisiensi pengelolaan air (Kumar et al., 2024; Maniam et al., 2026). Teknologi *monitoring* lengas tanah terus berkembang sebagai bagian penting dari sistem pertanian presisi karena mampu menyediakan informasi kondisi air tanah secara lebih terukur (Wiratmoko et al., 2026). Disisi lain, teknologi irigasi presisi berperan dalam meningkatkan efisiensi penggunaan air, produktivitas tanaman, dan keberlanjutan sistem pertanian (Wiratmoko et al., 2025). Penelitian lain menunjukkan bahwa jaringan sensor lengas tanah berbiaya rendah dapat digunakan sebagai alat bantu pengambilan keputusan dalam *monitoring* irigasi tetes (Abioye et al., 2021). Studi-studi tersebut menunjukkan bahwa integrasi sensor dan

sistem kendali memiliki peran strategis dalam pengembangan irigasi cerdas (Nugroho et al., 2026).

Beberapa penelitian telah mengembangkan sistem irigasi otomatis berbasis sensor lengas tanah dan *Internet of Things* (IoT) (Payero et al., 2026; Ramli and Jabbar, 2022; Shafira et al., 2023). Penelitian perancangan sistem irigasi cerdas berbasis sensor lengas tanah yang mampu mempertahankan kelembapan tanah pada rentang tertentu dan mengurangi konsumsi air dibandingkan metode konvensional (Pramanik et al., 2022). Namun, sebagian besar penelitian lebih menekankan pada implementasi perangkat keras, konektivitas, dan respons sistem irigasi secara umum (Abioye et al., 2021). Aspek dasar instrumentasi, seperti karakteristik kuantisasi ADC, resolusi pembacaan, kelayakan sampling, pengaruh noise, pengondisian sinyal, rekonstruksi tegangan, dan hubungan antara kualitas data digital dengan keputusan kendali pompa, masih belum banyak dibahas secara terintegrasi.

Dalam sistem monitoring berbasis microcontroller, sinyal analog dari sensor lengas tanah perlu dikonversi menjadi data digital melalui *Analog to Digital Converter* (ADC) (Afif et al., 2025). Kualitas hasil konversi ini sangat

menentukan kemampuan sistem dalam membaca perubahan tegangan sensor dan mengestimasi kadar lengas tanah (Progga et al., 2026). Pembacaan yang tidak stabil akibat *noise*, kesalahan kuantisasi, atau ketidaksesuaian level tegangan dapat memengaruhi keputusan kendali irigasi. Oleh karena itu, analisis sistem tidak cukup hanya melihat perubahan kadar lengas tanah dan status pompa, tetapi juga perlu mengevaluasi proses akuisisi data dari sinyal analog hingga menjadi dasar keputusan aktuasi.

Metode *hysteresis* merupakan salah satu pendekatan kendali sederhana yang sesuai untuk sistem irigasi otomatis berbasis ambang. Metode ini menggunakan dua batas keputusan, yaitu ambang bawah untuk mengaktifkan pompa dan ambang atas untuk mematikan pompa. Dengan adanya zona *hysteresis*, sistem dapat mengurangi risiko *switching* pompa yang terlalu sering ketika nilai sensor berfluktuasi di sekitar ambang kendali. Pendekatan ini relevan untuk sistem pertanian presisi karena keputusan irigasi diarahkan berdasarkan kondisi lengas tanah, bukan hanya berdasarkan interval waktu tertentu.

Tujuan penelitian ini adalah mensimulasikan sistem *monitoring* lengas tanah berbasis ADC dan kendali irigasi

otomatis menggunakan metode hysteresis untuk aplikasi pertanian presisi. Penelitian ini secara khusus mengevaluasi karakteristik kuantisasi ADC, kelayakan sampling, pengaruh filter RC terhadap kualitas sinyal, respons kendali pompa berdasarkan estimasi *Volumetric Water Content* (VWC), serta kelayakan antarmuka tegangan sensor menuju *microcontroller*. Kebaruan penelitian ini terletak pada penyusunan model simulasi terintegrasi yang menghubungkan aspek akuisisi sinyal, konversi analog-ke-digital, pengondisian sinyal, estimasi lengas tanah, dan keputusan kendali irigasi dalam satu alur analisis. Pendekatan ini diharapkan dapat menjadi dasar evaluasi awal sebelum sistem dikembangkan lebih lanjut pada perangkat keras dan diuji pada kondisi lapangan.

BAHAN DAN METODE

Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian dilaksanakan di Smart Agriculture Research Center, Departemen Teknik Pertanian dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta. Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Oktober 2025 hingga Februari 2026. Penelitian ini berbasis simulasi komputasional sehingga lokasi penelitian berperan sebagai tempat

pengembangan model, penyusunan algoritma simulasi, visualisasi hasil, dan analisis sistem.

Desain Simulasi

Penelitian ini menggunakan pendekatan simulasi komputasional untuk mengevaluasi rancangan sistem *monitoring* lengas tanah berbasis *Analog to Digital Converter* (ADC) dan kendali irigasi otomatis menggunakan metode *hysteresis*. Simulasi digunakan untuk merepresentasikan alur kerja sistem mulai dari pembacaan sinyal sensor, proses konversi analog-ke-digital, pengondisian sinyal, estimasi kadar lengas tanah, hingga pengambilan keputusan aktuasi pompa (Nugroho et al., 2023). Pendekatan ini dipilih karena penelitian difokuskan pada analisis awal rancangan sistem instrumentasi sebelum implementasi perangkat keras dan validasi lapangan.

Pengembangan model dilakukan menggunakan bahasa pemrograman Python pada lingkungan komputasi berbasis notebook. Pengolahan data numerik dilakukan menggunakan pustaka NumPy dan Pandas, sedangkan visualisasi hasil simulasi dilakukan menggunakan Matplotlib. Antarmuka simulasi interaktif dikembangkan menggunakan Gradio untuk memudahkan pengaturan parameter

sistem dan pengamatan respons simulasi secara langsung. Parameter utama yang digunakan meliputi resolusi ADC, tegangan referensi, frekuensi *sampling*, *noise* sensor, cut-off frequency filter, kadar lengas awal, ambang ON/OFF pompa, dan durasi simulasi.

Rancangan Model Simulasi

Model simulasi disusun sebagai sistem terintegrasi yang menghubungkan sensor lengas tanah, ADC, pengondisian sinyal, estimasi *Volumetric Water Content* (VWC), dan kendali pompa otomatis (Abioye et al., 2021). Sensor lengas tanah dimodelkan menghasilkan tegangan analog sebesar 0,50–2,50 V yang merepresentasikan kadar lengas tanah 0–60% VWC. Hubungan antara tegangan hasil pembacaan ADC dan kadar lengas tanah dimodelkan secara linear sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (1).

$$VWC = \left(\frac{V_{ADC} - 0,50}{2,00} \right) \times 60 \quad (1)$$

Dimana VWC adalah kadar lengas tanah volumetrik (%), sedangkan V_{ADC} adalah tegangan hasil rekonstruksi dari kode ADC (V). Persamaan ini digunakan sebagai model kalibrasi dasar untuk mengubah sinyal tegangan menjadi estimasi kadar lengas tanah. Proses

konversi tegangan analog menjadi kode digital ADC dimodelkan berdasarkan rasio antara tegangan input sensor dan tegangan referensi ADC. Kode ADC dihitung menggunakan Persamaan (2).

$$D = \text{round} \left(\frac{V_{in}}{V_{ref}} \times (2^n - 1) \right) \quad (2)$$

Dimana D adalah kode digital ADC, V_{in} adalah tegangan input sensor (V), V_{ref} adalah tegangan referensi ADC (V), dan n adalah resolusi ADC dalam bit. Persamaan ini digunakan untuk memperoleh kode ADC, mengevaluasi rentang kuantisasi, serta mengidentifikasi potensi saturasi sinyal (Afif et al., 2025). Pengondisian sinyal dilakukan dengan mensimulasikan filter RC low-pass sebelum sinyal dikonversi oleh ADC. Filter ini digunakan untuk mereduksi gangguan sinyal berfrekuensi tinggi yang dapat memengaruhi stabilitas pembacaan ADC.

Evaluasi filter difokuskan pada perubahan error sinyal sebelum dan sesudah proses filtering, sehingga pengaruh pengondisian sinyal terhadap kualitas data dapat dianalisis. Kendali irigasi otomatis dimodelkan menggunakan metode *hysteresis* dengan dua ambang keputusan. Ambang bawah digunakan untuk mengaktifkan pompa, sedangkan ambang atas digunakan untuk mematikan

pompa. Pada skenario utama, pompa diatur menyala ketika VWC lebih kecil dari 25% dan mati ketika VWC lebih besar dari 38%. Mekanisme dua ambang ini digunakan untuk mengurangi risiko switching pompa yang terlalu sering akibat fluktuasi kecil pada pembacaan sensor.

Selain model sensor dan kendali irigasi, simulasi mencakup analisis antarmuka tegangan sensor menuju microcontroller. Sinyal perangkat lapangan sebesar 12.00 V disesuaikan menjadi sekitar 3.00 V menggunakan rangkaian pembagi tegangan agar berada di bawah batas aman input microcontroller 3.30 V. Analisis ini diperlukan karena sistem monitoring pertanian umumnya berhadapan dengan perbedaan level tegangan antara perangkat lapangan dan unit kendali digital (Nugroho et al., 2025).

Prosedur dan Analisis Simulasi

Prosedur simulasi disusun untuk menggambarkan hubungan antara pembacaan sensor, kualitas sinyal, proses digitalisasi, dan keputusan aktuasi irigasi. Tahap awal, menetapkan parameter sistem, meliputi resolusi ADC 12 bit, tegangan referensi 3.30 V, frekuensi sampling, karakteristik *noise*, parameter filter RC, kadar lengas awal, ambang

kendali pompa, dan durasi simulasi. Selanjutnya, sinyal analog sensor dibangkitkan sesuai rentang tegangan sensor lengas tanah diberi *noise* untuk merepresentasikan gangguan pembacaan pada kondisi lapang (Nugroho et al., 2023).

Sinyal yang telah dibangkitkan kemudian diproses melalui pengondisian sinyal menggunakan filter RC low-pass dan dikonversi menjadi kode digital menggunakan model ADC. Kode digital tersebut direkonstruksi kembali menjadi tegangan hasil pembacaan, kemudian dikonversi menjadi nilai VWC. Nilai VWC digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan kendali pompa menggunakan metode *hysteresis*. Respons sistem diamati melalui perubahan kadar lengas tanah, status pompa, kode ADC, durasi pompa ON, dan *duty cycle* pompa selama periode simulasi (Abioye et al., 2021).

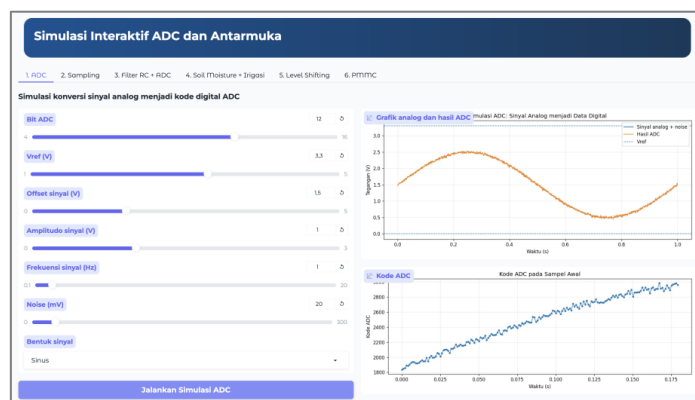
Analisis hasil simulasi dilakukan pada lima aspek utama. Pertama, karakteristik ADC dianalisis berdasarkan jumlah level digital, nilai *Least Significant Bit* (LSB), error kuantisasi, RMS error kuantisasi, dan rentang kode ADC. Kedua, kelayakan sampling dievaluasi menggunakan kriteria Nyquist untuk memastikan bahwa sinyal analog dapat

direpresentasikan secara memadai dalam domain digital. Ketiga, efektivitas filter RC dianalisis berdasarkan penurunan error sinyal sebelum dan sesudah proses *filtering*. Keempat, respons kendali irigasi dianalisis berdasarkan perubahan VWC, status pompa, total durasi pompa ON, dan *duty cycle* pompa.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Kuantisasi ADC pada Sistem Monitoring Lengas Tanah

Simulasi sistem monitoring lengas tanah diawali dengan evaluasi karakteristik ADC sebagai komponen utama dalam proses akuisisi data. Pada skenario utama, ADC dikonfigurasi dengan resolusi 12bit dan tegangan referensi 3.3 V. Konfigurasi ini dipilih untuk merepresentasikan sistem *microcontroller* modern berbasis tegangan kerja 3.3 V yang umum digunakan pada instrumentasi pertanian berbasis sensor (Afif et al., 2025; Kumar et al., 2024).



Gambar 1. Simulasi konversi sinyal analog sensor menjadi kode digital ADC

Tabel 1. Parameter Kuantisasi dan Karakteristik Resolusi ADC pada Sistem Monitoring Lengas Tanah

No.	Parameter	Nilai	Keterangan
1	Resolusi ADC	12 bit	Resolusi konversi analog ke digital
2	Jumlah level digital	4,096 level	Dihitung dari 2^{12}
3	Tegangan referensi ADC, V_{ref}	3.30 V	Batas atas pembacaan ADC
4	Least Significant Bit, LSB	0.8059 mV/count	Resolusi tegangan per kenaikan 1 kode ADC
5	Error kuantisasi teoritis	± 0.4029 mV	$\pm 0,5$ LSB
6	Kode ADC minimum	562	Kode minimum pada rentang sinyal simulasi
7	Kode ADC maksimum	3,136	Kode maksimum pada rentang sinyal simulasi
8	RMS error kuantisasi	0.2301 mV	Error rata-rata kuadrat hasil kuantisasi

Hasil simulasi menunjukkan bahwa ADC 12 bit menghasilkan 4.096 level digital dengan kode maksimum 4,095. Nilai *Least Significant Bit* (LSB) sebesar 0.8059 mV/count menunjukkan bahwa setiap kenaikan satu kode ADC merepresentasikan perubahan tegangan sebesar 0.8059 mV. Secara matematis, resolusi ADC dihitung menggunakan Persamaan (3).

$$LSB = \frac{V_{ref}}{2^n - 1} \quad (3)$$

Dengan $V_{ref}=3.30$ V dan $n=12$, diperoleh nilai $LSB=0.8059$ mV/count. Error kuantisasi teoritis sebesar $\pm 0,4029$ mV dan RMS error kuantisasi sebesar 0,2301 mV menunjukkan bahwa kesalahan akibat pembulatan digital relatif kecil terhadap rentang sinyal sensor. Rentang kode ADC yang diperoleh berada pada kisaran 562 hingga 3,136. Nilai ini masih berada di bawah kode maksimum 4,095, sehingga sinyal sensor tidak mengalami saturasi.

Hal ini penting karena saturasi akan menyebabkan hilangnya informasi pada bagian sinyal yang melebihi tegangan referensi ADC. Dengan demikian, konfigurasi ADC yang digunakan telah mampu membaca sinyal analog sensor lengas tanah secara aman. Jika sensor

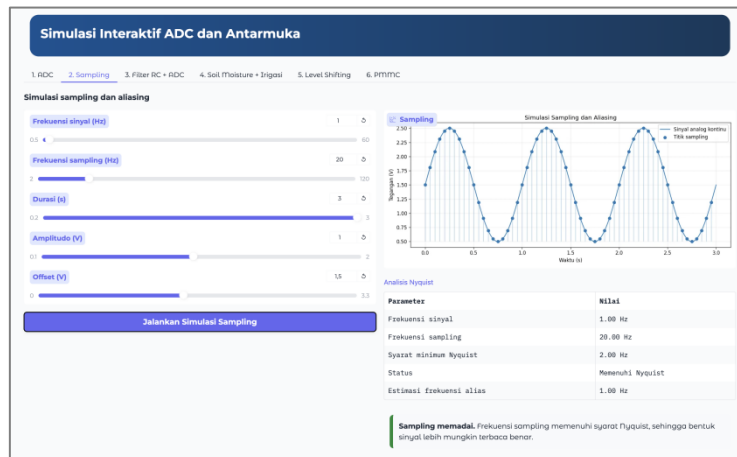
lengas tanah dimodelkan memiliki keluaran 0.50–2.50 V untuk merepresentasikan 0–60% volumetric water content (VWC), maka resolusi pembacaan lengas tanah per satu kode ADC dapat dihitung menggunakan Persamaan (4).

$$R_{VWC} = LSB \times \frac{60}{2.50 - 0.50} \quad (4)$$

Berdasarkan Persamaan (3), estimasi resolusi VWC adalah 0,0242%/count. Nilai ini menunjukkan bahwa ADC 12 bit secara teoritis cukup sensitif untuk membaca perubahan kecil pada sinyal sensor lengas tanah. Namun, sensitivitas teoritis tersebut tetap perlu dibedakan dari akurasi lapangan karena performa aktual masih dipengaruhi noise sensor, stabilitas tegangan referensi, kualitas antarmuka, dan proses kalibrasi (Nugroho et al., 2023).

Evaluasi Sampling dan Kelayakan Representasi Sinyal Digital

Proses *sampling* dievaluasi untuk memastikan bahwa sinyal analog sensor dapat direpresentasikan secara memadai dalam domain digital. Pada simulasi ini, frekuensi sinyal ditetapkan sebesar 1.00 Hz dan frekuensi sampling sebesar 20.00 Hz.



Gambar 2. Simulasi sampling sinyal sensor dan evaluasi kriteria Nyquist.

Tabel 2. Evaluasi Kelayakan Frekuensi Sampling Berdasarkan Kriteria Nyquist

No.	Parameter	Nilai	Keterangan
1	Frekuensi sinyal	1.00 Hz	Frekuensi perubahan sinyal analog yang disimulasikan
2	Frekuensi sampling	20.00 Hz	Frekuensi pengambilan sampel oleh sistem akuisisi data
3	Syarat minimum Nyquist	2.00 Hz	Dihitung dari $2 \times$ frekuensi sinyal
4	Status sampling	Memenuhi Nyquist	Frekuensi sampling lebih besar dari syarat minimum
5	Estimasi frekuensi alias	1.00 Hz	Tidak menunjukkan indikasi aliasing dominan

Kelayakan frekuensi sampling dianalisis menggunakan kriteria Nyquist sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (5).

$$f_s \geq 2f_{\text{signal}} \quad (5)$$

Dengan frekuensi sinyal 1.00 Hz, syarat minimum Nyquist adalah 2.00 Hz. Frekuensi sampling yang digunakan, yaitu 20.00 Hz, telah melebihi syarat minimum tersebut. Oleh karena itu, proses *sampling* pada simulasi ini dinyatakan memenuhi kriteria Nyquist. Gambar 2 menunjukkan bahwa titik sampling mengikuti bentuk

sinyal analog dengan baik. Hal ini menunjukkan bahwa sinyal sensor dapat direpresentasikan secara memadai dalam bentuk digital tanpa indikasi *aliasing* dominan. Dalam implementasi lapangan, perubahan lensa tanah umumnya berlangsung jauh lebih lambat dibandingkan sinyal 1 Hz. Oleh karena itu, frekuensi sampling aktual dapat dibuat lebih rendah untuk menghemat energi dan penyimpanan data. Namun, frekuensi 20 Hz pada simulasi ini tetap relevan sebagai pendekatan visual untuk menjelaskan

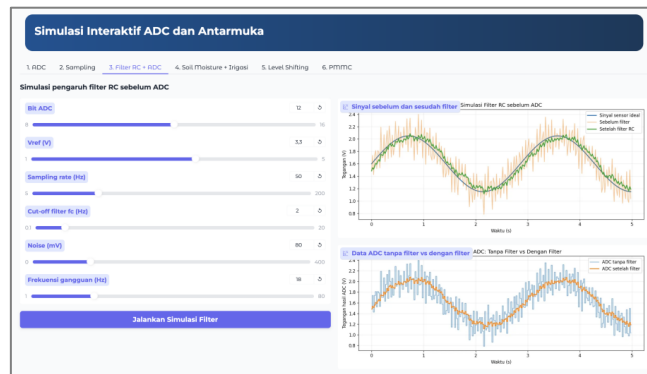
hubungan antara sinyal analog, titik sampling, dan data digital (Zhang et al., 2024).

Pengaruh Filter RC terhadap Kualitas Sinyal Sebelum Konversi ADC

Sinyal sensor pada sistem pertanian lapangan berpotensi mengalami gangguan akibat fluktuasi catu daya, kabel panjang, kelembapan, kualitas *grounding*, dan interferensi elektromagnetik. Oleh karena itu, filter RC low-pass disimulasikan

sebagai pengkondisi sinyal sebelum sinyal masuk ke ADC. Pada simulasi ini, filter RC menggunakan *cut-off frequency* 2.00Hz, resistor 10kΩ, dan kapasitor 7.96μF.

Hasil evaluasi menunjukkan bahwa RMSE sinyal sebelum filter sebesar 197.06mV, sedangkan RMSE setelah filter turun menjadi 68.18mV. Persentase penurunan RMSE dihitung menggunakan Persamaan (6) (Syarovy et al., 2023, 2022).



Gambar 3. Perbandingan sinyal sebelum dan sesudah filter RC serta hasil konversi ADC

Tabel 3. Evaluasi Kinerja Filter RC sebelum Konversi ADC

No.	Parameter	Nilai	Keterangan
1	Resolusi ADC	12 bit	Resolusi ADC yang digunakan dalam simulasi filter
2	Tegangan referensi ADC, V_{ref}	3.30 V	Batas atas pembacaan ADC
3	Least Significant Bit, LSB	0.8059 mV/count	Resolusi tegangan per kode ADC
4	Sample rate	50.0 Hz	Frekuensi pengambilan data setelah sinyal dikondisikan
5	Cut-off frequency filter, f_c	2.00 Hz	Frekuensi batas filter low-pass RC
6	Resistor filter, R	10 kΩ	Nilai resistor acuan dalam desain filter
7	Kapasitor filter, C	7.96 μF	Nilai kapasitor hasil perhitungan untuk $f_c = 2$ Hz
8	RMSE tanpa filter	197.06 mV	Error sinyal sebelum proses filtering
9	RMSE dengan filter	68.18 mV	Error sinyal setelah proses filtering

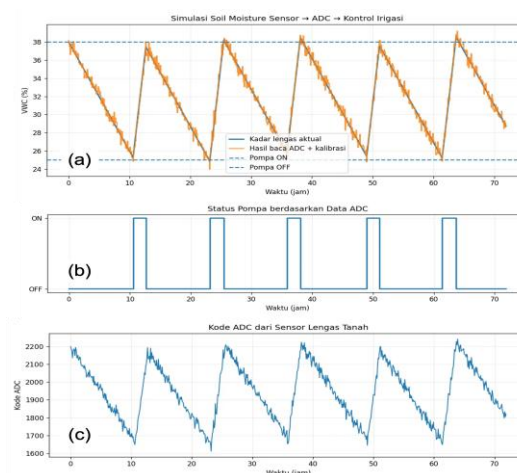
$$\Delta RMSE = \frac{RMSE_{tanpa\ filter} - RMSE_{filter}}{RMSE_{tanpa\ filter}} \times 100\% \quad (6)$$

Berdasarkan Persamaan (5), filter RC menurunkan RMSE sebesar 65,4%. Penurunan ini menunjukkan bahwa filter RC efektif memperbaiki kualitas sinyal sebelum proses digitalisasi. Pada Gambar 3, sinyal setelah filter tampak lebih halus dan lebih dekat dengan sinyal ideal dibandingkan sinyal sebelum filter. Dampak serupa juga terlihat pada data ADC, di mana pembacaan setelah *filtering* menjadi lebih stabil. Hasil ini menunjukkan bahwa resolusi ADC yang tinggi tidak cukup apabila sinyal analog yang masuk masih mengandung noise besar. Dengan demikian, kualitas sistem

monitoring lengas tanah tidak hanya ditentukan oleh jumlah bit ADC, tetapi juga oleh kualitas pengkondisi sinyal sebelum konversi digital (Rudrakar and Rughani, 2024).

Respons Kendali Irigasi Otomatis Berbasis Hysteresis

Bagian utama simulasi ini adalah integrasi antara sensor lengas tanah, ADC, konversi tegangan menjadi VWC, dan kendali pompa otomatis menggunakan metode hysteresis. Pada skenario utama, pompa diatur ON ketika VWC lebih kecil dari 25% dan OFF ketika VWC lebih besar dari 38%. Dua ambang tersebut membentuk zona hysteresis sebesar 13% VWC.



Gambar 4. Respons sistem monitoring lengas tanah dan kendali irigasi otomatis berbasis hysteresis: (a) VWC aktual dan hasil pembacaan ADC, (b) status pompa, dan (c) kode ADC sensor lengas tanah.

Tabel 4. Output Simulasi Monitoring Lengas Tanah dan Kendali Irigasi Otomatis Berbasis *Hysteresis*

No.	Output Simulasi	Nilai	Keterangan
1	Kode ADC terakhir	1,821	Nilai digital terakhir hasil pembacaan ADC
2	Tegangan ADC terakhir	1.4675 V	Tegangan hasil rekonstruksi dari kode ADC
3	VWC terbaca terakhir	29.02%	Estimasi kadar lengas tanah berdasarkan pembacaan sensor
4	Status pompa terakhir	OFF	Kondisi akhir aktuator irigasi
5	Total durasi pompa ON	11.00 jam	Akumulasi waktu pompa aktif selama simulasi
6	Resolusi tegangan ADC	0.8059 mV/count	Resolusi tegangan sistem akuisisi data
7	Estimasi resolusi VWC	0.0242%/count	Perubahan VWC untuk setiap kenaikan 1 kode ADC

Logika kendali *hysteresis* yang digunakan dalam simulasi dituliskan pada Persamaan (7).

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Pompa} = \text{ON}, \text{VWC} < \text{VWC}_{\text{ON}} \\ \text{Pompa} = \text{OFF}, \text{VWC} > \text{VWC}_{\text{OF}} \\ \text{Status dipertahankan}, \text{VWC}_{\text{ON}} \leq \text{VWC} \end{array} \right. \quad (7)$$

Gambar 4(a) menunjukkan bahwa VWC menurun secara bertahap ketika pompa berada dalam kondisi OFF. Ketika VWC turun hingga mendekati ambang bawah 25%, sistem mengaktifkan pompa. Setelah pompa aktif, VWC meningkat hingga mencapai ambang atas 38%, kemudian pompa kembali dimatikan. Pola ini membentuk siklus pengeringan dan pembasahan selama 72 jam simulasi.

Gambar 4(b) menunjukkan bahwa pompa bekerja secara periodik tanpa switching berlebihan. Kondisi ini

menunjukkan bahwa metode *hysteresis* mampu menjaga kestabilan aktuasi meskipun pembacaan VWC masih memiliki fluktuasi akibat *noise*. Tanpa *hysteresis*, pompa berpotensi sering ON/OFF ketika nilai sensor berada di sekitar satu ambang kendali (Saggi and Jain, 2022; Wiratmoko et al., 2023).

Gambar 4(c) menunjukkan bahwa kode ADC mengikuti perubahan VWC. Ketika kadar lengas tanah menurun, kode ADC ikut menurun. Sebaliknya, ketika irigasi dilakukan, kode ADC meningkat kembali. Hubungan ini menunjukkan bahwa proses konversi analog-ke-digital berhasil merepresentasikan dinamika lengas tanah menjadi data numerik dapat digunakan sebagai dasar kendali (Nugroho et al., 2023).

Berdasarkan Tabel 4, kode ADC terakhir adalah 1.821 dengan tegangan rekonstruksi 1,4675 V. Nilai tersebut dikonversi menjadi VWC sebesar 29,02%. Karena nilai tersebut berada di antara ambang ON 25% dan OFF 38%, status akhir pompa adalah OFF. Hasil ini konsisten dengan logika hysteresis karena sistem mempertahankan status pompa ketika nilai VWC berada dalam zona kendali.

Total durasi pompa ON selama simulasi adalah 11.00 jam dari total durasi 72.00jam. *Duty cycle* pompa dihitung menggunakan Persamaan (8).

$$DC = \frac{t_{ON}}{t_{total}} \times 100\% \quad (8)$$

Dengan $t_{ON}=11.00$ jam dan $t_{total}=72.00$ jam, diperoleh *duty cycle* sebesar 15.28%. Nilai ini menunjukkan bahwa pompa hanya aktif ketika kondisi lengas tanah membutuhkan penambahan air. Dengan demikian, sistem tidak bekerja berdasarkan jadwal tetap, tetapi berdasarkan respons terhadap kondisi lengas tanah yang dibaca melalui sensor dan ADC (Afif et al., 2025).

Implikasi Pertanian Presisi dan Keterbatasan Simulasi

Hasil simulasi menunjukkan bahwa sistem monitoring lengas tanah

berbasis ADC dapat menjadi dasar pengambilan keputusan irigasi otomatis yang lebih terukur. ADC 12 bit dengan tegangan referensi 3.30 V menghasilkan resolusi 0.8059 mV/count dan estimasi resolusi VWC sebesar 0.0242%/count. Nilai ini menunjukkan bahwa sistem memiliki sensitivitas digital yang baik untuk membaca perubahan kecil pada sinyal sensor.

Namun, hasil simulasi menunjukkan bahwa kualitas pembacaan tidak hanya ditentukan oleh resolusi ADC, tetapi juga oleh stabilitas sinyal sebelum proses digitalisasi. Filter RC mampu menurunkan RMSE dari 197.06 mV menjadi 68.18 mV, sehingga sinyal menjadi lebih stabil sebelum digunakan sebagai dasar kendali pompa.

Dari sisi kendali, metode hysteresis dengan ambang ON pada VWC < 25% dan OFF pada VWC > 38% mampu menghasilkan respons pompa yang stabil. Selama simulasi 72 jam, pompa aktif selama 11 jam dengan *duty cycle* 15.28%. Hal ini menunjukkan bahwa aktuasi irigasi berlangsung berdasarkan kondisi lengas tanah, bukan berdasarkan jadwal tetap. Zona hysteresis sebesar 13% VWC juga membantu mencegah switching pompa yang terlalu sering akibat fluktuasi pembacaan sensor. Pendekatan ini relevan

untuk aplikasi pertanian presisi karena mendukung penggunaan air yang lebih adaptif, efisien, dan berbasis data.

Simulasi ini masih memiliki keterbatasan karena hubungan tegangan sensor dan VWC dimodelkan secara linear, sedangkan pada kondisi nyata respons sensor dapat dipengaruhi oleh tekstur tanah, salinitas, suhu, kepadatan tanah, dan kualitas kontak sensor dengan media. Dinamika lengas tanah juga masih disederhanakan dan belum memasukkan proses infiltrasi, drainase, evapotranspirasi aktual, curah hujan, serta kedalaman perakaran. Selain itu, *noise* sensor masih dimodelkan sebagai gangguan acak sederhana, sementara gangguan lapangan dapat berasal dari catu daya, kabel panjang, grounding, kelembapan, dan rangkaian antarmuka. Oleh karena itu, penelitian lanjutan perlu diarahkan pada validasi sensor aktual, pengujian perangkat keras, dan perbandingan hysteresis dengan strategi kendali lain seperti kontrol berbasis evapotranspirasi, fuzzy logic, atau model *predictive control* (Kandamali et al., 2025; Nugroho et al., 2023).

KESIMPULAN DAN SARAN

Simulasi sistem monitoring lengas tanah berbasis ADC dan kendali irigasi

otomatis menggunakan metode hysteresis berhasil merepresentasikan alur akuisisi sinyal, konversi analog-ke-digital, pengondisian sinyal, estimasi VWC, dan keputusan aktuasi pompa secara terintegrasi. ADC 12 bit dengan tegangan referensi 3.30 V menghasilkan resolusi 0.8059 mV/count dan estimasi resolusi 0.0242% VWC/count. Frekuensi sampling 20.00 Hz memenuhi kriteria Nyquist terhadap sinyal 1.00 Hz, sedangkan filter RC low-pass mampu menurunkan RMSE dari 197.06 mV menjadi 68.18 mV. Metode hysteresis dengan ambang ON pada VWC < 25% dan OFF pada VWC > 38% juga mampu menghasilkan respons pompa yang stabil. Selama simulasi 72 jam, pompa aktif selama 11.00 jam dengan duty cycle 15.28%, sehingga aktuasi irigasi berlangsung berdasarkan kondisi lengas tanah, bukan berdasarkan jadwal tetap. Selain itu, rangkaian pembagi tegangan mampu menurunkan sinyal 12.00 V menjadi 3.000 V sehingga aman untuk input microcontroller 3.30 V.

Pengembangan selanjutnya perlu diarahkan pada validasi menggunakan sensor lengas tanah aktual di lapangan melalui kalibrasi pada berbagai jenis tanah, kadar air, suhu, salinitas, dan kondisi lingkungan berbeda. Model dinamika lengas tanah perlu diperluas

dengan memasukkan faktor infiltrasi, drainase, evapotranspirasi, curah hujan, dan kedalaman perakaran agar lebih mendekati kondisi nyata. Selain itu, implementasi perangkat keras perlu dilakukan untuk menguji kinerja sensor, ADC, filter, rangkaian proteksi, dan aktuator pompa secara langsung. Metode hysteresis dapat dibandingkan dengan strategi kendali lain, seperti kontrol berbasis evapotranspirasi, fuzzy logic, atau model *predictive control*, agar sistem irigasi otomatis yang dikembangkan menjadi lebih adaptif, efisien, dan siap diterapkan pada pertanian presisi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan apresiasi dan terima kasih kepada *Working Group Food Security (WGFS 1.2) Precision Agriculture and Smart Farming*, Pusat Unggulan Antar Perguruan Tinggi (PUAPT) Universitas Gadjah Mada atas dukungan fasilitas penelitian. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada *Smart Agriculture Research Center*, Departemen Teknik Pertanian dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, Universitas Gadjah Mada atas dukungan teknis, kolaborasi riset, pendampingan ilmiah, serta lingkungan akademik yang mendukung pelaksanaan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Abioye, E.A., Abidin, M.S.Z., Mahmud, M.S.A., Buyamin, S., AbdRahman, M.K.I., Otuoze, A.O., Ramli, M.S.A., Ijike, O.D. 2021. IoT-based monitoring and data-driven modelling of drip irrigation system for mustard leaf cultivation experiment. *Information Processing in Agriculture* 8, 270–283.
- Afif, S., Wiratmoko, A., Nugroho, A.P., Okayasu, T., Sutiarto, L. 2025. Design of Smart Plant Electrical Signal Monitoring System for Indoor Farming. *BIO Web Conf.* 167, 05004.
- Kandamali, D.F., Kiobia, D.O., Ngimbwa, P.C., Mwitwa, C.J., McLemore, A., Porter, E., Porter, W., Rains, G.C. 2025. Soil Moisture Prediction Using LSTM And Ensemble Learning Methods. *IFAC-PapersOnLine* 59, 297–302.
- Kumar, V., Sharma, K.V., Kedam, N., Patel, A., Kate, T.R., Rathnayake, U. 2024. A comprehensive review on smart and sustainable agriculture using IoT technologies. *Smart Agricultural Technology* 8, 100487.
- Maniam, S., Tee, Y.-K., Memar, E., Wong, H.Y., Zaman, M. 2026. Smart irrigation management: IoT-based RNN-LSTM model for soil moisture prediction in precision agriculture. *Smart Agricultural Technology* 13, 101866.
- Nugroho, A.P., Kusumawati, N.B., Murtiningrum, Wiratmoko, A., Haryadi, I.M., Pradana, F.A., Suwardi, Sukarman, Primananda, S., Sutiarto, L. 2023. Development of Soil Moisture Content Monitoring System for Precision Measurement of Soil Moisture in Sub-Optimal Land for Palm Oil Plantation. *BIO Web Conf.* 69, 05003.

- Nugroho, A.P., Wiratmoko, A., Nugraha, D., Markumningsih, S., Sutiarmo, L., Falah, M.A.F., Okayasu, T., 2025. Development of a low-cost thermal imaging system for water stress monitoring in indoor farming. *Smart Agricultural Technology* 11, 101048.
- Nugroho, A.P., Wiratmoko, A., Oktasari, U.D., Kusumawardani, R.F., Pradana, F.A., Sutiarmo, L., Sukarman, Suwardi, Primananda, S., Okayasu, T. 2026. A confidence-weighted decision framework for on-site fertilizer quality screening and off-spec detection in smart agricultural systems using low-cost macronutrient sensors. *Smart Agricultural Technology* 102103.
- Payero, J.O., Sekaran, U., Turner, D.B. 2026. Using a wireless sensor network and the Internet of Things (IoT) to automate a lateral move irrigation system based on real-time soil water potential data. *Smart Agricultural Technology* 14, 102003.
- Pramanik, M., Khanna, M., Singh, M., Singh, D.K., Sudhishri, S., Bhatia, A., Ranjan, R. 2022. Automation of soil moisture sensor-based basin irrigation system. *Smart Agricultural Technology* 2, 100032.
- Progga, J.F., Zhang, X., Maiti, S., Sun, X., Dey, S., Eshkabilov, S., Feng, X. 2026. A chip-based radio frequency sensor for soil moisture measurements: A machine learning and deep learning calibration approach. *J. Agric. Food Res.* 25, 102591.
- Ramli, R.M., Jabbar, W.A. 2022. Design and implementation of solar-powered with IoT-Enabled portable irrigation system. *Internet of Things and Cyber-Physical Systems* 2, 212–225.
- Rudrakar, S., Rughani, P. 2024. IoT based Agriculture (Ag-IoT): A detailed study on Architecture, Security and Forensics. *Information Processing in Agriculture* 11, 524–541.
- Saggi, M.K., Jain, S. 2022. A Survey Towards Decision Support System on Smart Irrigation Scheduling Using Machine Learning approaches. *Archives of Computational Methods in Engineering* 29, 4455–4478.
- Shafira, A., Nugraha, S., Suhendra, T. 2023. Design of Internet of Things (IoT) based Soil Moisture Monitoring System Using Solar Power in Urban Agriculture (Horticulture). In: *Proceedings of the 1st International Conference on Sustainable Engineering Development and Technological Innovation, ICSEDTI 2022*, 11-13 October 2022, Tanjungpinang, Indonesia. EAI.
- Sreeram, R., Adithya Krishna, S., Kumar, A.S., Remya, S., Cho, Y.Y. 2026. Soil moisture monitoring technologies in smart agriculture: A comprehensive review. *Farming System* 4, 100189.
- Syarovy, M., Nugroho, A.P., Sutiarmo, L., Suwardi, Muna, M.S., Wiratmoko, A., Sukarman, Primananda, S. 2022. Utilization of Big Data in Oil Palm Plantation to Predict Production Using Artificial Neural Network Model.
- Syarovy, M., Nugroho, A.P., Sutiarmo, L., Suwardi, Muna, M.S., Wiratmoko, A., Sukarman, Primananda, S. 2023. Prediction of Oil Palm Production Using Recurrent Neural Network Long Short-Term Memory (RNN-LSTM). pp. 55–66.
- Wiratmoko, A., Nugroho, A.P., Afif, S., Arsyad, F., Ramadhanty, M.A., Sutiarmo, L. 2025. Analisis Dinamika Vapor Pressure Deficit

- pada Lingkungan Mikroklimat Padi Sawah Terbuka Berbasis Smart Automatic Weather Station Tipe Ultrasonik. *Journal of Agricultural and Biosystem Engineering Research* 6, 118.
- Wiratmoko, A., Nugroho, A.P., Muna, M.S., Syarovy, M., Suwardi, Sukarman, Sutiarso, L. 2023. Development of Cloud-Based Decision Support System for Fertilizer Management - A Case Study in Wilmar Oil Palm Plantation. In: *Proceedings of the International Conference on Sustainable Environment, Agriculture and Tourism* (ICOSEAT 2022). Atlantis Press.
- Wiratmoko, A., Nugroho, A.P., Ramadhanty, M.A., Arsyad, F., Pradana, F.A., Pamungkas, B.S., Sutiarso, L., Okayasu, T. 2026. Predicting Physiological Health States of Tropical Papaya Using UAV Multispectral Imagery for Precision Agriculture Monitoring. *Agricultural Environment and Sustainability* 100023.
- Zhang, X., Feng, G., Sun, X. 2024. Advanced technologies of soil moisture monitoring in precision agriculture: A Review. *J. Agric. Food Res.* 18, 101473.