

Pengembangan Sistem Otomasi *Infiltrometer* Berbasis ESP 8266 dan *Absolute Rotary Encoder*

Development of Infiltrometer Automation System Based on ESP 8266 and Absolute Rotary Encoder

*Rahmat H. Anasiru, Rafi R. Hendranawan, Budi Priyonggo, Arief Wicaksono, Rahmat, Raditya Pramana

Politeknik Enjiniring Pertanian Indonesia, Indonesia

DOI: [10.34145/agriekstensia.v25i1.3982](https://doi.org/10.34145/agriekstensia.v25i1.3982)

Published online: Juni 2026

Accepted for publication: May 2026

ABSTRAK

Pengukuran laju infiltrasi tanah secara manual menggunakan *double ring infiltrrometer* (DRI) sering kali tidak efisien secara waktu dan rentan terhadap kesalahan pencatatan oleh petugas lapangan. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan memvalidasi sistem pengukuran laju infiltrasi otomatis berbasis mikrokontroler ESP8266 yang terintegrasi dengan *analog rotary encoder*, RTC, GPS, dan modul microSD. Data tinggi muka air diperoleh melalui konversi nilai ADC dari *rotary encoder* menggunakan fungsi kalibrasi linier $y = 0,1198 \times ADC - 34,716$ dengan determinasi $R^2 = 0,9961$. Sistem ini secara otomatis mencatat data setiap 5 menit bersamaan dengan informasi waktu dan koordinat lokasi dalam format .csv. Hasil uji performa menunjukkan rata-rata *error* sebesar 0,42 cm/jam dengan persentase *error* hanya 0,17%. Nilai *Mean Absolute Error* (MAE) sebesar 0,90 cm/jam dan *Root Mean Square Error* (RMSE) sebesar 1,12 cm/jam menunjukkan akurasi dan konsistensi yang sangat baik di bawah ambang batas kesalahan 5%. Implementasi sistem ini terbukti meningkatkan efisiensi kerja lapangan secara signifikan, mereduksi beban kerja petugas, serta menghilangkan risiko kesalahan manusia dalam pembacaan visual. Alat ini sangat layak digunakan oleh penyuluh pertanian dan praktisi lapangan sebagai alternatif modern untuk mendukung manajemen irigasi presisi dan konservasi lahan berbasis data digital yang valid.

Kata Kunci: *Absolute Rotary Encoder*, *Double Ring Infiltrrometer*, ESP8266, Laju Infiltrasi, Otomatisasi

ABSTRACT

Manual soil infiltration measurement using a double ring infiltrrometer (DRI) is often time-consuming and prone to recording errors by field practitioners. This research aims to design and validate an automated infiltration rate measurement system based on the ESP8266 microcontroller integrated with an analog rotary encoder, RTC, GPS, and a microSD module. Water level data were obtained by converting ADC values from the rotary encoder using a linear calibration function $y = 0,1198 \times ADC - 34,716$ with a coefficient of determination $R^2 = 0,9961$. The system automatically records data every 5 minutes along with time stamps and location coordinates in .csv format. Performance test results showed an average error of 0.42 cm/h with an error percentage of only 0.17%. The Mean Absolute Error (MAE) of 0.90 cm/h and Root Mean Square Error (RMSE) of 1.12 cm/h demonstrate excellent accuracy and consistency, well below the 5% error threshold. Implementation of this system significantly improves field work efficiency, reduces operator workload, and eliminates human error in visual readings. This tool is highly suitable for agricultural extension workers and field practitioners as a modern alternative to support precision irrigation management and soil conservation based on valid digital data.

Keywords: Absolute Rotary Encoder, Automation, Double Ring Infiltrrometer, ESP8266, Infiltration Rate.



Copyright © 2026 Authors. This is an open access article [under the CC-BY-SA license](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/).

*Penulis Koresponden

Email : rhanasiru@gmail.com

Alamat : Jl. Sinarماس Boulevard No 1. Pagendangan. Tangerang

Hal: 47-61

PENDAHULUAN

Pengukuran laju infiltrasi tanah merupakan indikator kunci dalam manajemen irigasi dan konservasi lahan di tingkat petani. Data laju infiltrasi yang akurat sangat dibutuhkan oleh penyuluh pertanian dan praktisi di lapangan untuk menentukan jadwal irigasi yang presisi, mencegah erosi, serta mengoptimalkan penyerapan pupuk cair ke dalam tanah (Faridah dkk., 2023). Namun fakta di lapangan menunjukkan bahwa pengukuran laju infiltrasi sering kali diabaikan karena metode konvensional menggunakan *Double Ring Infiltrometer* (DRI) dianggap sangat menyita waktu dan tenaga (Fahmida, 2023).

Ditingkat global, perubahan iklim telah memicu peningkatan intensitas cuaca ekstrem dan penurunan pola curah hujan, yang secara langsung mengganggu stabilitas siklus hidrologi lahan (IPCC, 2021). Fenomena ini menjadi tantangan serius dalam mencapai tujuan pembangunan berkelanjutan (SDGs) ke 13 (Penanganan Perubahan Iklim) dimana pemahaman mendalam mengenai dinamik air tanah menjadi kunci dalam strategi adaptasi dan mitigasi bencana *hidrometeorologi* seperti kekeringan dan banjir. Kegagalan dalam mengelola laju infiltrasi tanah tidak hanya berdampak pada kerusakan struktur lahan, tetapi juga berdampak langsung pada penurunan produktivitas pertanian global. Hal ini menciptakan efek domino terhadap SDG ke 2 (Tanpa Kelaparan) dan SDG ke 1 (Tanpa Kemiskinan), mengingat penurunan hasil panen akibat manajemen air yang buruk akan melemahkan kerawanan pangan dan menurunkan pendapatan petani (FAO, 2022). Oleh karena itu, ketersediaan data infiltrasi yang presisi melalui teknologi digital sangat penting. Bukan sekedar parameter teknis, data ini adalah fondasi bagi kebijakan manajemen air yang tangguh dalam menghadapi krisis iklim global guna menjamin kelangsungan pangan dan kesejahteraan ekonomi masyarakat tani.

Panduan metode DRI mengajarkan petugas atau penyuluh untuk mengamati di titik lokasi selama berjam-jam guna mencatat penurunan muka air disetiap interval waktu tertentu. Proses yang berulang ini tidak hanya tidak efisien secara waktu (*man-hours*), tetapi juga rentan terhadap kesalahan manusia (*human error*) akibat kelelahan fisik atau distorsi persepsi saat membaca skala penggaris di bawah terik matahari (Fatehnia dkk., 2016). Keterbatasan dalam metode manual, seperti intensitas tenaga kerja yang tinggi dan potensi bias pengamatan, telah memunculkan desakan teknis untuk beralih ke sistem pengukuran otomatis guna menjamin kualitas data hidrologi (Smith dkk., 2019). Hambatan teknis ini menyebabkan data infiltrasi jarang tersedia secara lengkap di tingkat unit desa ataupun balai penyuluhan, padahal data tersebut adalah landasan dalam perencanaan usahatani yang adaptif terhadap perubahan iklim (IPCC, 2021).

Memasuki era transformasi digital di sektor pertanian, kendala efisiensi tersebut kini dapat dimitigasi melalui penerapan teknologi otomasi alat ukur berbasis biaya rendah (*low-cost technology*). Penggunaan *mikrokontroler* ESP2866 yang diintegrasikan dengan sensor *absolute rotary encoder* menawarkan solusi instrumen yang tidak hanya akurat secara ilmiah, tetapi juga praktis untuk dioperasikan oleh petugas lapangan, *surveyor* maupun petani tanpa memerlukan latar belakang teknik yang rumit. Dengan sistem pencatatan data otomatis pada kartu *microSD*, beban kerja di lapangan dapat dikurangi secara signifikan, karena perangkat ini mampu bekerja secara mandiri sehingga pengguna dapat melakukan aktivitas lainnya secara bersamaan tanpa khawatir kehilangan momentum pengambilan data.

Pengembangan sistem otomasi ini mendesak untuk dilakukan sebagai upaya modernisasi sarana penyuluhan pertanian. Alat yang portabel, murah dan mandiri dalam pengambilan data akan meningkatkan efisiensi kerja lapangan secara signifikan (Reynolds & Elrick, 2018). Dengan tersedianya data infiltrasi yang presisi dan waktu nyata, pengambilan keputusan teknis terkait irigasi dapat dilakukan lebih cepat dan akurat, yang pada akhirnya akan meningkatkan produksi hasil pertanian secara berkelanjutan.

Upaya digitalisasi alat ukur infiltrasi telah menjadi fokus perhatian dalam berbagai penelitian terkini untuk menekan ketergantungan pada pengamatan manual. Kumar dkk. (2020) telah mengembangkan sistem pengukuran infiltrasi otomatis yang terbukti mampu mengurangi beban kerja operator di lapangan secara signifikan dengan tingkat akurasi yang lebih baik. Selanjutnya, Chen dkk. (2022) merancang sistem berbasis *Internet of Things* (IoT) menggunakan *mikrokontroler* ESP32 dan

sensor level air untuk memantau laju infiltrasi secara kontinu dan waktu nyata. Di sisi lain, Espinoza dkk. (2021) tekanan pada pengembangan perangkat pemantauan berbiaya rendah (*biaya rendah*) yang adaptif untuk berbagai kondisi lahan. Meskipun demikian, sebagian besar sistem otomatis sebelumnya masih mengandalkan sensor ultrasonik atau sensor tekanan yang sering kali mengalami gangguan akurasi akibat suhu lingkungan atau adanya hambatan fisik di permukaan air. Penggunaan *Absolut Rotary Encoder* yang dikombinasikan dengan mekanisme pelampung dalam penelitian ini menawarkan stabilitas data yang lebih tinggi dan presisi yang lebih baik, sekaligus tetap menjaga kemudahan operasional bagi pengguna di tingkat lapangan.

Sistem pencatatan digital berbasis *mikrokontroler* menjadi solusi yang relevan. Teknologi ini memungkinkan pengumpulan data secara akurat, dan minim intervensi manusia. Penggunaan ESP8266 sebagai *mikrokontroler* utama, dan *analog rotary encoder* dapat mengintegrasikan pemantauan laju infiltrasi. Sistem ini juga dapat dilengkapi dengan modul penyimpanan (*microSD*), dan RTC (*Real Time Clock*) untuk penanda waktu (Imran dkk., 2022; Supriyo dkk., 2024). Berdasarkan masalah tersebut, penelitian ini difokuskan pada bagaimana merancang sistem otomasi laju infiltrasi menggunakan komponen ESP8266 (Andini dkk., 2024) dan *Absolut Rotary Encoder* (ARE) yang ramah bagi pengguna dan praktisi serta efektivitas dan akurasi yang dihasilkan oleh sistem otomatis terintegrasi modul penyimpanan data dan tampilan layar sehingga memudahkan pengguna pada proses pengukuran laju infiltrasi.

METODE PENELITIAN

Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian dilaksanakan mulai bulan Juni sampai November 2025. Proses perakitan sistem elektronik dilakukan pada Laboratorium Rekayasa Lahan dan Air Pertanian, Politeknik Enjiniring Pertanian Indonesia (PEPI). Adapun uji kinerja lapangan dilakukan pada lahan percobaan.

Bahan dan Alat

Pemilihan komponen didasarkan pada prinsip keterjangkauan (*biaya rendah*) dan kemudahan pemeliharaan agar dapat diaplikasikan secara luas di tingkat lapangan.

a. Perangkat Keras (*Hardware*)

Adapun perangkat keras yang digunakan yakni *Mikrokontrol* ESP826 (Wemos DI Mini), sensor *Absolut Rotary Encoder* P3022-V1-CW360, modul RTC DS1307 untuk penanda waktu, modul *MicroSD* untuk menyimpan data mandiri, GPS Neo-6M untuk pemetaan lokasi otomatis, dan Laya OLED 0,96 inci sebagai layar monitor untuk pengguna. Pemilihan *absolute rotary encoder* sebagai sensor utama didasarkan pada kemampuannya dalam memberikan data posisi yang presisi tanpa memerlukan proses reset saat sistem diaktifkan kembali. Penggunaan sensor jenis ini memungkinkan pengukuran yang lebih stabil karena memiliki mekanisme internal yang mampu meminimalkan kesalahan pembacaan posisi dibandingkan sensor inkremental biasa (Lee dkk., 2020).

b. Perangkat Fisik

Infiltrometer Double Ring Infiltrometer berbahan tahan karat 304 (diameter 30 cm dan 60 cm) yang dirancang agar tahan korosi pada kondisi tanah lembab.

c. Perangkat Lunak

Arduino IDE untuk pemrograman sistem kontrol dan *Microsoft Excel* untuk analisis data komparati.

Tahapan Pengembangan Sistem

Penelitian dilakukan melalui empat tahapan utama yang sistematis yaitu:

a. Perancangan Sistem Elektronik dan Mekanik

Mengintegrasikan sensor dengan mekanisme pelampung bola pimpong yang ringan dan responsif terhadap perubahan muka air.

b. Sensor Kalibrasi

Melakukan uji laboratorium untuk menemukan korelasi antara nilai ADC (Konverter Analog ke Digital) dari pengkode dengan ketinggian air ril dalam satuan centimeter (cm).

c. Uji Fungsional Mandiri

Penghubung semua modul (GPS, RTC, dan MicroSD) dapat bekerja secara harmonis tanpa intervensi operator secara terus menerus.

d. Uji Banding Lapangan (Validasi)

Melakukan pengukuran laju infiltrasi secara sistem antara sistem otomatis dengan metode manual (penggaris dan *stopwatch*) pada titik yang sama untuk mengukur efisiensi dan akurasi.

Adapun bagan alir pelaksanaan penelitian dapat dilihat pada Gambar1.

Uji Lapang *Infiltrometer*

Untuk menguji kemudahan operasional, prosedur kerja alat dirancang mungkin bagi pengguna:

- Menanam *double ring* dalam tanah sesuai standar.
- Menyalakan unit sensor otomatis di atas ring dalam.
- Mengaktifkan sistem (pencatatan dimulai secara otomatis setiap interval 5 menit).
- Memantau laju infiltrasi secara *realtime* melalui layar OLED tanpa perlu mencatat secara manual.
- Setelah selesai, data diambil dari MicroSD dalam format .csv yang siap diolah.

Analisis Data & Efisiensi

Akurasi sistem dievaluasi menggunakan metrik statistik *Mean Absolute Error* (MAE) dan *Root Mean Square Error* (RMSE). Selain akurasi teknis, dilakukan analisis deskriptif terhadap aspek efisiensi kerja, yaitu perbandingan waktu dan tenaga yang dihabiskan antara metode otomatis dan metode manual dalam satu siklus pengujian (60-90 menit).

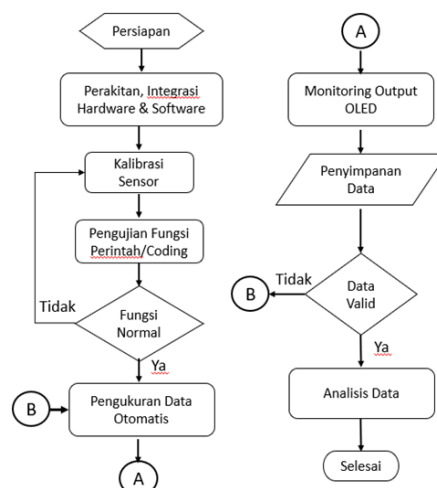
HASIL DAN PEMBAHASAN

Rancangan Sistem Otomasi

Rancangan sistem digital otomasi pada *infiltrometer* terdiri dari beberapa komponen sebagai berikut:

- Sistem pengukuran ketinggian muka air, menggunakan sensor *analog rotary encoder*. berfungsi untuk mendeteksi penurunan tinggi muka air di dalam ring *infiltrometer* yang diakibatkan oleh proses infiltrasi,
- Sistem pencatatan waktu, menggunakan modul RTC., berfungsi untuk mencatat waktu pengukuran secara akurat dan berkelanjutan
- Sistem konversi nilai ADC (*Analog to Digital Converter*) ke ketinggian, berfungsi untuk mengubah sinyal ADC dari *analog rotary encoder* menjadi data perubahan tinggi muka air dalam satuan centimeter (cm).
- Sistem data prosesing, untuk memproses hasil pengukuran menjadi format yang dapat disimpan dan divisualisasikan, seperti tinggi muka air (ΔH), serta Δt .
- Sistem penyimpanan data, berfungsi untuk menyimpan hasil perhitungan dan pencatatan ke dalam kartu *microSD*, dalam format file yang dapat dibaca dan diolah lebih lanjut di *microsoft excel*.

Gambar 1. Diagram Alir Penelitian



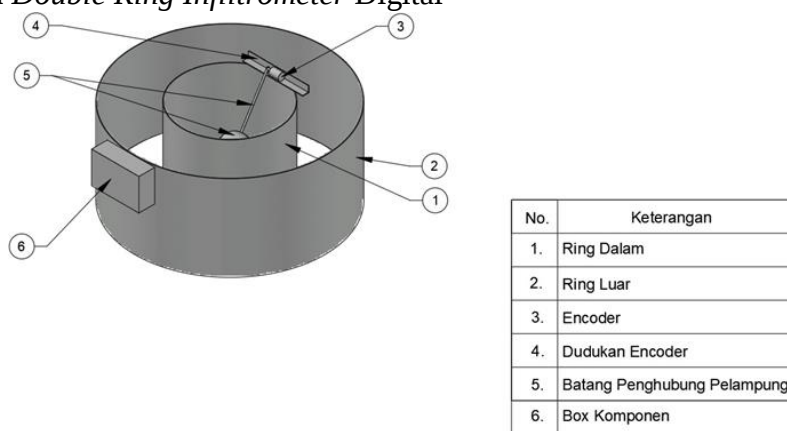
Rancangan Struktural

Rancangan struktural prototipe double ring *infiltrometer* digital yang telah dibuat dibagi menjadi dua bagian utama, yaitu struktur mekanik dan struktur elektrik. Struktur mekanik berfungsi sebagai media utama dalam proses infiltrasi air ke dalam tanah, sedangkan struktur elektrik berfungsi untuk mencatat perubahan tinggi muka air dan menyimpannya dalam format digital (Gambar 2). Pemilihan material *Stainless Steel 304* efektif menjaga stabilitas alat di lapangan. Material ini tahan terhadap korosi air tanah dan memberikan beban yang cukup agar ring tidak mudah bergeser (Hidayat dkk., 2024). Penggunaan baterai 5V dengan konsumsi daya ESP8266 yang rendah memungkinkan alat bekerja mandiri di lokasi terpencil tanpa memerlukan sumber listrik eksternal, menjadikannya sarana pendukung yang aplikatif.

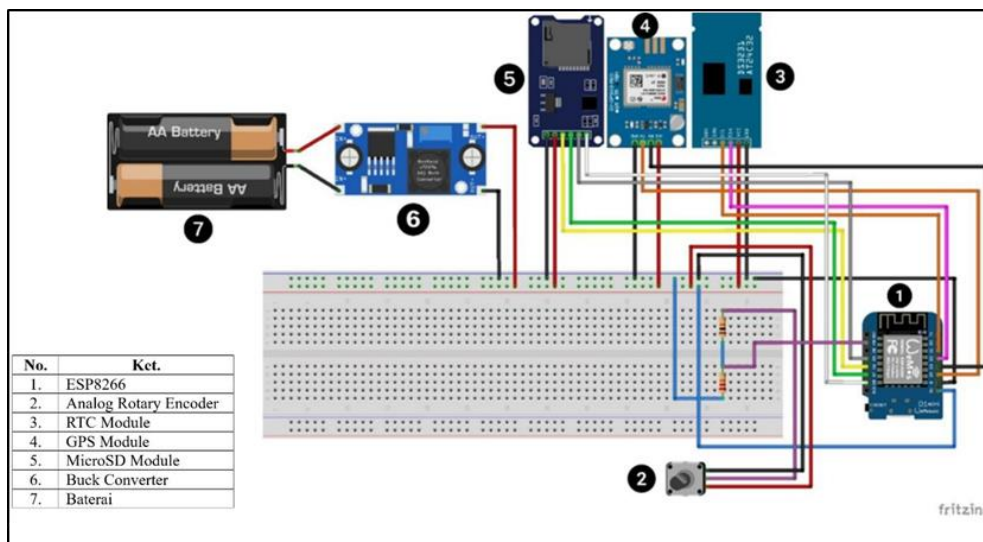
Rancangan Komponen Eletronik

Komponen elektronik yang dirancang dengan beberapa komponen pendukung dan hasil dari rancangan elektronik (Gambar 3.)

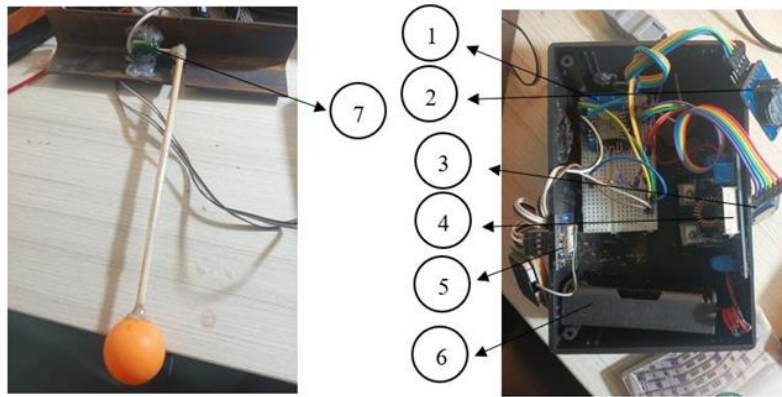
Gambar 2. Skema *Double Ring Infiltrometer* Digital



Gambar 3. Skema Rancangan Elektronik



Gambar 4. Rancangan Elektronik



Keterangan:

1. ESP8266 Wemos D1 Mini
2. RTC Module DS1307
3. MicroSD Module
4. Buck Converter
5. GPS Module
6. Baterai Holder
7. Analog rotary encoder

Analog Digital Converter

Adapun sensor yang digunakan untuk mengukur ketinggian air ialah *analog rotary encoder* tipe P3022-V1-CW360. Sensor ini dipasang secara mekanis menggunakan pelampung berupa bola pingpong yang dihubungkan dari batang ke poros *encoder*. Tinggi muka air akan berubah saat pelampung naik atau turun sehingga memutar poros *encoder*, dan menghasilkan perubahan tegangan. *Encoder* ini memiliki tiga pin utama, yaitu VCC, GND, dan OUT. Pin OUT akan mengeluarkan sinyal tegangan *analog* yang nilainya berubah sesuai dengan rotasi poros *encoder*.

Encoder ini dihubungkan ke *mikrokontroler* ESP8266 dengan konfigurasi pin VCC dihubungkan ke *output* 5V dari baterai, GND ke ground, dan OUT ke pin A0 (ADC) dari ESP8266. ESP8266 hanya mampu membaca tegangan hingga 3.3V pada pin ADC, sedangkan *output encoder* dapat mencapai 5V, maka digunakan rangkaian pembagi tegangan (*voltage divider*) untuk menurunkan tegangan dari *encoder*. Rangkaian ini terdiri dari dua buah *resistor*, yaitu $R1 = 10k\Omega$ dan $R2 = 20k\Omega$, yang dirangkai secara seri. Titik tengah antara kedua *resistor* ini dihubungkan ke pin A0, sehingga tegangan *output encoder* yang semula 5V akan diturunkan menjadi sekitar 3.3V.

Nilai ADC yang terbaca oleh ESP8266 merupakan hasil konversi dari tegangan analog ke nilai digital dengan resolusi 10 bit, sehingga rentang pembacaan berada pada 0 hingga 1023. Semakin besar tegangan *output* dari *encoder*, maka nilai ADC yang terbaca juga akan semakin tinggi. Nilai ini kemudian digunakan dalam fungsi kalibrasi linier untuk menghitung menjadi tinggi muka air (Tabel 2).

Validitas dan Presisi Sensor

Kelebihan sensor utama ini dibandingkan pengamatan manual terletak pada resolusi pembacaannya. Jika pada metode manual (penggaris) mata manusia hanya mampu membaca ketelitian hingga 1 mm dalam kondisi statistik, sensor *Encoder* mampu mendeteksi perubahan tegangan analog yang sangat halus (nilai ADC) secara kontinyu. Hal ini menghilangkan bias paralaks (kesalahan sudut pandang) yang sering dialami petugas lapangan saat melakukan pembacaan manual di bawah terik matahari atau pada permukaan air yang tidak stabil.

Berdasarkan data hasil kalibrasi yang telah diperoleh, dilakukan analisis regresi linier untuk menemukan persamaan hubungan antara nilai ADC dan tinggi muka air. Grafik kalibrasi disajikan pada (Gambar 5), diperoleh persamaan kalibrasi $y = 0,1198X - 34,716$ dengan nilai $R^2 = 0,9961$ yang kemudian digunakan untuk fungsi kalibrasi *encoder*. Validasi dilakukan dengan membandingkan

hasil konversi menggunakan fungsi kalibrasi terhadap pengukuran tinggi muka air secara manual menggunakan penggaris. Hasil validasi disajikan pada (Gambar 6), dimana didapatkan $R^2 = 0,9961$ menunjukkan sensor bekerja dengan baik dan dapat digunakan untuk mengukur tinggi permukaan air. Secara ilmiah, nilai ini mengindikasikan bahwa sensor memiliki konsistensi yang luar biasa dalam menerjemahkan rotasi mekanis pelampung menjadi data digital ketinggian air.

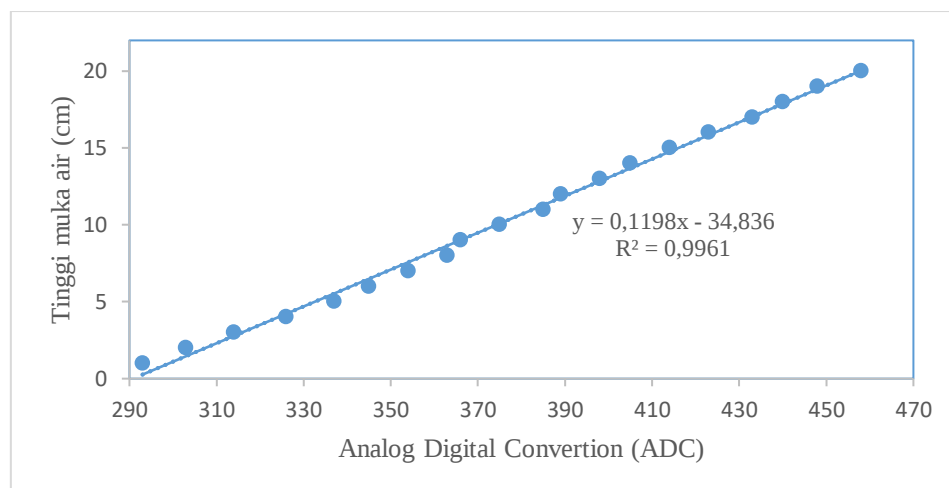
Penggunaan *absolute rotary encoder* memberikan keunggulan dibandingkan sensor ultrasonik konvensional. Mekanisme pelampung yang terhubung langsung ke poros *encoder* meminimalkan risiko kesalahan pembacaan akibat riak air atau suhu lingkungan yang sering mengganggu sensor ultrasonik pada penelitian sebelumnya (Espinoza dkk., 2021). Presisi ini sangat krusial dalam pengukuran infiltrasi, di mana penurunan air dalam hitungan milimeter harus tercatat secara akurat untuk menentukan karakteristik hidrologi tanah secara tepat (Chen dkk., 2022).

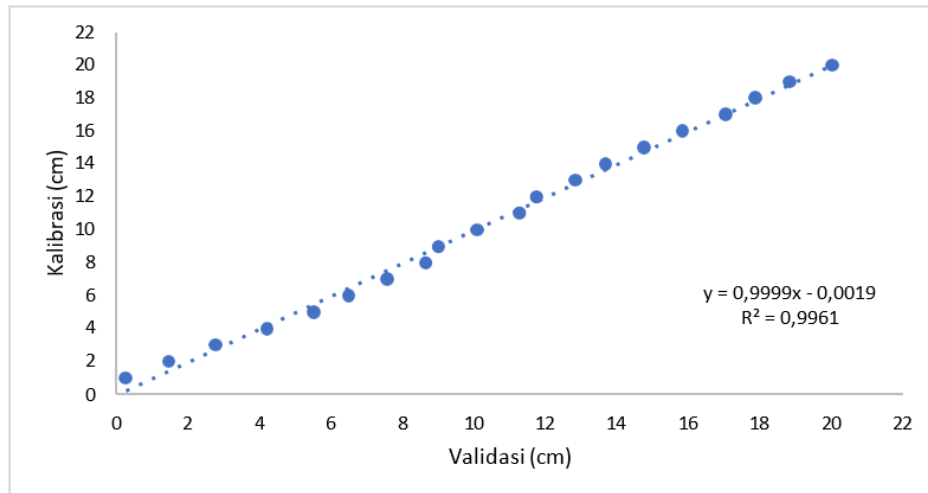
Tabel 2. Kalibrasi Nilai ADC dengan Tinggi Muka Air

Tinggi Muka Air (cm)	Tegangan (V)	ADC
20	1,491	458
19	1,458	448
18	1,432	440
17	1,409	433
16	1,377	423
15	1,348	414
14	1,318	405
13	1,296	398
12	1,266	389
11	1,253	385
10	1,221	375
9	1,191	366
8	1,182	363
7	1,152	354
6	1,123	345
5	1,097	337
4	1,061	326
3	1,022	314
2	0,986	303
1	0,954	293

Sumber: Data Diolah

Gambar 5. Kalibrasi *Encoder*



Gambar 6. Validasi *Encoder*

Tabel 3. Perbandingan Waktu RTC

No	Waktu RTC	Waktu Asli	Selisih (detik)
1.	12:58:21	12:58:23	-2
2.	12:58:22	12:58:24	-2
3.	12:58:23	12:58:25	-2
4.	12:58:24	12:58:26	-2
5.	12:58:25	12:58:27	-2
6.	12:58:26	12:58:28	-2
7.	12:58:27	12:58:29	-2
8.	12:58:28	12:58:30	-2
9.	12:58:29	12:58:31	-2
10.	12:58:30	12:58:32	-2
11.	12:58:31	12:58:33	-2
12.	12:58:32	12:58:34	-2
13.	12:58:33	12:58:35	-2
14.	12:58:34	12:58:36	-2
15.	12:58:35	12:58:37	-2

Sumber: Data Diolah

Akurasi RTC Module (*Real Time Clock*) dan GPS

RTC *module* yang digunakan ialah tipe DS1307 yang berfungsi mencatat waktu (jam, menit, detik) dan tanggal (hari, bulan, tahun) secara terus-menerus dengan bantuan sumber daya dari baterai cadangan (*coin cell*) yang terpasang pada RTC *module* (Imran dkk., 2022). RTC *module* dihubungkan ke *mikrokontroler* ESP8266 melalui komunikasi I2C, di mana pin SDA dan SCL terhubung langsung ke pin D2 dan D1 dari ESP8266. *Output* dari RTC berupa informasi waktu digital akan dibaca dan digunakan untuk menandai waktu setiap pengambilan data pengukuran. Perbandingan Waktu RTC dan Waktu normal.

Hasil uji modul RTC DS1307 (Tabel 3) menunjukkan selisih waktu yang konstan sebesar -2 detik dibandingkan waktu acuan. Konsistensi selisih ini membuktikan bahwa sistem memiliki stabilitas penanda waktu (*penanda waktu*) yang dapat diandalkan untuk pengambilan data interval 5 menit. Keunggulan ini sangat krusial bagi penyuluh pertanian; pada metode manual, petugas sering kali terlambat menekan *stopwatch* atau mencatat waktu karena terganggunya aktivitas lain. Dengan sistem otomatis, interval waktu terkunci secara presisi oleh program.

Tabel 4. Perbandingan Koordinat *Module* dengan Pembanding

No.	Koordinat <i>Latitude</i>	GPS <i>Module Longitude</i>	Koordinat <i>Latitude</i>	Pembanding <i>Longitude</i>
1.	-6.305842	106.636787	-6.305958	106.636906
2.	-6.305858	106.636842	-6.305958	106.636906
3.	-6.305844	106.636881	-6.305958	106.636906

Sumber: Data Diolah

Pengujian terhadap akurasi GPS *module* dilakukan dengan membandingkan hasil pembacaan koordinat dari GPS *module* terhadap koordinat acuan yang diperoleh dari hasil koordinat aplikasi GPS *map camera*. Dari tiga kali pengukuran pada titik lokasi tetap, diperoleh rata-rata deviasi posisi sebesar $\pm 15,3$ m terhadap koordinat pembanding. Nilai ini menunjukkan bahwa GPS *module* yang digunakan masih berada dalam kategori akurat. Penelitian yang dilakukan oleh Pagoti & Indira (2020) menunjukkan bahwa sistem GPS secara umum mampu memberikan akurasi posisi dalam rentang 4 hingga 20 m dari posisi sebenarnya, tergantung pada kondisi lingkungan dan interferensi sinyal.

Modul integrasi GPS Neo-6M (Tabel 4) dengan rata-rata deviasi posisi 15,3 m memberikan nilai tambah pada aspek dokumentasi. Alat ini secara otomatis melampirkan koordinat lokasi pada setiap baris penyaringan data. Keunggulan ini memudahkan pembuatan peta sebaran laju infiltrasi lahan secara spasial, suatu pekerjaan yang tidak mungkin dilakukan secara cepat dengan metode pencatatan manual.

Komparasi Pengukuran *Encoder* Versus Manual

Untuk mengkomparasi pengukuran digital versus manual dilakukan pengujian kinerja alat selama 60 menit dengan interval pengambilan data setiap 5 menit. Terdapat beberapa poin penting yang menunjukkan keunggulan sistem digital dibandingkan metode manual. Data menunjukkan bahwa sistem digital mampu menangkap tren penurunan yang sangat identik dengan pengukuran manual. Kedekatan nilai ini membuktikan bahwa sensor *absolute rotary encoder* memiliki akurasi yang sangat tinggi dalam mendeteksi perubahan elevasi air di dalam ring, sebagaimana hasil penelitian terdahulu yang menyatakan bahwa sistem otomatis mampu menghasilkan data yang lebih konsisten dibandingkan dengan pengamatan visual yang terbatas oleh kesalahan operator (Kumar dkk., 2020). Selain itu, penggunaan sensor ini secara signifikan mereduksi kesalahan sudut pandang yang sering menjadi sumber bias utama pada pembacaan skala secara manual di lapangan (Fatehnia dkk., 2016).

Meskipun terdapat perbedaan nilai absolut tinggi muka air antara manual (dimulai dari 10 cm) dan digital (dimulai dari 11,16 cm) yang disebabkan oleh *offset* posisi nol pelampung, fokus utama pengukuran infiltrasi adalah pada selisih penurunan air (ΔH). Data menunjukkan bahwa sistem digital mampu menangkap tren penurunan yang sangat identik dengan pengukuran manual. Sebagai contoh, pada menit ke-5, metode manual mencatat penurunan 0,5 cm, sementara sistem digital mencatat 0,48 cm. Kedekatan nilai ini membuktikan bahwa sensor *absolute rotary encoder* memiliki akurasi yang sangat tinggi dalam mendeteksi perubahan elevasi air di dalam ring (Smith dkk., 2019).

Sistem digital memberikan data yang lebih "jujur" dan presisi melalui kolom *Analog Digital Converter* (ADC). Nilai ADC yang menurun secara bertahap (dari 383 ke 347) menunjukkan bahwa sensor bekerja secara kontinu mendeteksi setiap rotasi sekecil apa pun dari poros pelampung. Hal ini memberikan data yang lebih detail dibandingkan pengamatan mata manusia yang cenderung melakukan pembulatan angka pada skala penggaris.

Laju infiltrasi konstan (*steady state*) yang terukur oleh sistem digital ini menunjukkan nilai yang konsisten dengan karakteristik fisik tanah di lokasi pengujian. Hal ini memperkuat temuan Lewis dkk. (2021) yang menyatakan bahwa akurasi dalam menentukan titik stabil infiltrasi sangat krusial untuk menghindari *overestimasi* atau *underestimasi* dalam perencanaan kebutuhan air irigasi. Salah satu keunggulan signifikan yang terlihat pada Tabel 5 adalah kolom koordinat (*Latitude* dan *Longitude*). Secara manual, petugas harus mencatat lokasi secara terpisah, namun sistem digital ini secara otomatis mengintegrasikan posisi geografis pada setiap baris data (misalnya: -6.306596, 106.638073).

Tabel 5. Perbandingan Pengukuran Infiltrasi Manual dan *Encoder*

Pengukuran Manual			Pengukuran <i>Encoder</i>				
Waktu (menit)	Tinggi Muka Air (cm)	ΔH (cm)	Analog Digital Converter	Tinggi Muka Air (cm)	ΔH (cm)	Latitude	Longitude
0	10	0	383	11.16	0	-6.306596	106.638073
5	9.5	0.5	379	10.68	0.48	-6.306591	106.638085
10	9	0.5	376	10.32	0.36	0	0
15	8.6	0.4	373	9.96	0.36	-6.306593	106.638101
20	8.2	0.4	368	9.37	0.6	-6.30659	106.638098
25	7.8	0.4	365	9.01	0.36	-6.306599	106.638086
30	7.5	0.3	362	8.65	0.36	-6.30659	106.638083
35	7.2	0.3	359	8.29	0.36	-6.306592	106.638084
40	6.9	0.3	356	7.93	0.36	-6.30659	106.638078
45	6.7	0.2	354	7.69	0.36	0	0
50	6.5	0.2	352	7.45	0.24	-6.306584	106.638077
55	6.3	0.2	349	7.09	0.36	0	0
60	6.1	0.2	347	6.85	0.24	0	0

Sumber: Data Diolah

Terdapat beberapa baris yang menunjukkan nilai "0" (pada menit ke-10, 45, 55, dan 60) akibat kendala sementara sinyal satelit di bawah rimbun vegetasi atau cuaca, fitur ini tetap memberikan keuntungan besar dalam pemetaan lahan secara digital dan memastikan akuntabilitas data bahwa pengukuran benar-benar dilakukan di titik lokasi yang ditentukan. Keunggulan utama sistem otomasi ini adalah konsistensi pengambilan data. Pada metode manual, ketepatan waktu sangat bergantung pada kedisiplinan operator menggunakan *stopwatch*. Kesalahan sedikit saja dalam waktu baca dapat menyebabkan deviasi besar pada nilai laju infiltrasi (Kumar dkk., 2020). Sebaliknya, sistem berbasis ESP8266 yang terintegrasi dengan RTC DS1307 memastikan data tercatat tepat setiap 5 menit dengan selisih waktu hanya -2 detik dari waktu asli (Tabel 5). Akurasi waktu ini menjamin reliabilitas data jangka panjang, terutama pada pengujian yang memakan waktu lebih dari 60 menit.

Sistem infiltrometer otomatis berbasis ESP8266 ini mampu menyediakan resolusi data temporal yang tinggi melalui pencatatan setiap 5 menit. Ketersediaan data yang bersifat *real-time* ini memberikan keunggulan dalam analisis hidrologi lahan, di mana pemantauan yang berkelanjutan merupakan kunci utama dalam keberhasilan pengelolaan air yang responsif dan efisien di tingkat usahatani (Jones & Smith, 2023). Secara keseluruhan, Tabel 5 membuktikan bahwa data yang dihasilkan oleh sistem otomatis jauh lebih kaya informasi. Selain mencatat laju infiltrasi, alat ini sekaligus mendokumentasikan waktu presisi dan lokasi secara *real-time*. Bagi seorang penyuluh, data digital ini menghilangkan proses *input* ulang dari kertas ke komputer, sehingga risiko kesalahan pengetikan dapat dihindari dan laporan hasil evaluasi lahan dapat diterbitkan lebih cepat.

Efisiensi dan Minimize Human Error

Berdasarkan perbandingan laju infiltrasi antara metode manual dan digital (Gambar 9), terlihat bahwa pola grafik yang menunjukkan tren penurunan yang serupa. Hasil analisis statistik (Tabel 5) menunjukkan rata-rata *kesalahan* hanya sebesar 0,42 cm/jam dengan persentase *kesalahan* rata-rata 0,17%. Nilai *kesalahan* yang sangat kecil ini (jauh di bawah ambang batas 5%) menyatakan bahwa alat otomatis ini memiliki akurasi yang setara dengan metode manual, namun dengan proses yang jauh lebih efisien. Kelebihan operasional yang paling menonjol terlihat pada visualisasi Gambar 7. Pada metode manual, data bersifat diskrit dan terbatas pada kemampuan pencatatan manusia. Sementara itu, sistem digital menghasilkan file luaran .csv yang langsung tersimpan di kartu *microSD*. Hal ini memberikan tiga keuntungan teknis bagi praktisi lapangan:

- Pengurangan Beban Kerja: Petugas tidak perlu berjaga secara statistik di depan alat selama 60-90 menit.
- Data Integritas: Menghilangkan risiko data hilang, kertas basah di lapangan, atau salah tulis angka.

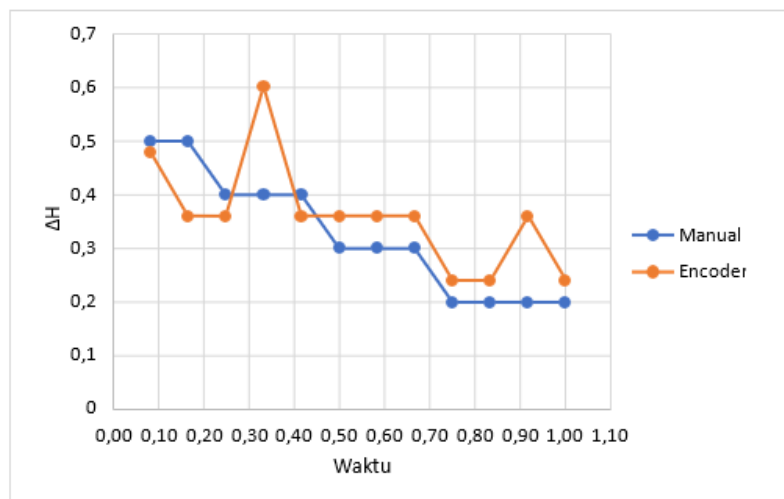
c. Kesiapan Analisis: Data digital dalam format .csv dapat langsung diolah menjadi grafik laporan melalui *ponsel pintar* atau laptop tanpa perlu pengetikan ulang (*input data manual*).

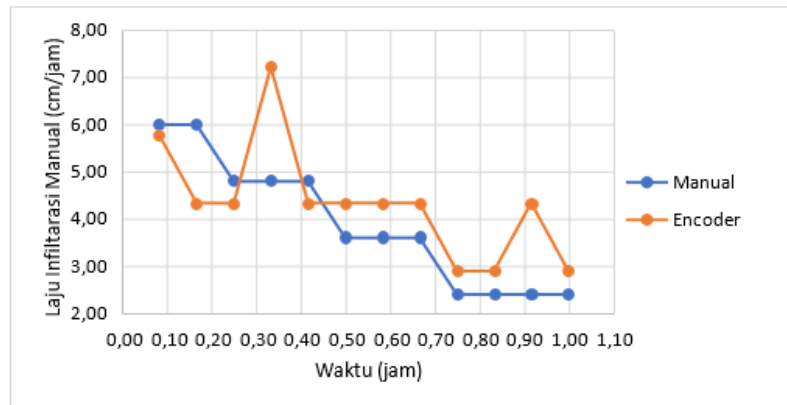
Grafik beda tinggi muka air (ΔH) terhadap waktu yang ditunjukkan pada (Gambar 8) menunjukkan pola penurunan yang tidak sepenuhnya stabil. Pola penurunan cenderung fluktuatif, dengan dua titik yang mengalami kenaikan nilai ΔH secara tiba-tiba, yaitu pada interval waktu 0,33 jam (menit ke-20) dan 0,92 jam (menit ke-55). Kenaikan ini terjadi akibat perubahan nilai ADC yang tidak selalu konstan, di mana terkadang terjadi penurunan besar dalam satu interval.

Hal ini yang berdampak langsung pada nilai laju infiltrasi yang diperoleh dari rumus laju infiltrasi seperti yang ditunjukkan pada (Gambar 9). Laju infiltrasi yang terukur secara digital pada lokasi pengujian menunjukkan kurva penurunan yang stabil setelah menit ke-40. Karakteristik ini sejalan dengan penelitian Arbaningrum dkk. (2022) yang menyatakan bahwa pada area terbuka dengan vegetasi tertentu, laju infiltrasi akan mencapai kondisi konstan (*steady state*) setelah durasi waktu tertentu bergantung pada tingkat kepadatan tanah dan pori makro tanah tersebut. Kenaikan ΔH pada dua titik waktu tersebut menyebabkan nilai laju infiltrasi juga mengalami lonjakan tajam pada waktu yang sama. Grafik laju infiltrasi mencerminkan respons langsung dari perubahan ΔH yang fluktuatif. Sistem pengukuran digital yang digunakan masih mengalami ketidakstabilan pembacaan sinyal. Perubahan kecil pada nilai ADC dapat menghasilkan selisih tinggi muka air yang tampak signifikan. Ketidakteraturan ini berdampak langsung pada hasil perhitungan laju infiltrasi, sehingga grafik tidak sepenuhnya memperlihatkan penurunan yang konsisten menurun.

Hasil analisis statistik (Tabel 6) menunjukkan bahwa rata-rata *error* laju infiltrasi alat adalah 0,42 cm/jam dengan persentase kesalahan hanya 0,17%. Nilai *Mean Absolute Error* (MAE) sebesar 0,90 cm/jam dan *Root Mean Square Error* (RMSE) sebesar 1,12 cm/jam membuktikan bahwa deviasi alat berada dalam rentang yang sangat tolerabel. Menurut kriteria Nabila & Nursusanto (2024), tingkat *error* di bawah 5% mengategorikan alat ukur digital dalam kelas "Baik" dan layak digunakan secara profesional di lapangan. Rendahnya persentase *error* sebesar 0,17% pada sistem ini membuktikan efektivitas sensor *absolute encoder* dalam menangkap setiap pergeseran mekanis pelampung secara akurat. Stabilitas data ini dimungkinkan karena sensor tersebut memiliki resolusi tinggi yang mampu mengompensasi fluktuasi sinyal kecil yang sering terjadi pada perangkat elektronik berbasis mikrosistem (Lee dkk., 2020).

Gambar 8. Perbandingan Perubahan Tinggi Muka Air (ΔH)



Gambar 9. Perbandingan Laju Infiltrasi antara Pengukuran Manual dan Encoder

Tabel 6. Analisis Error

No.	Laju Infiltrasi (Manual)	Laju Infiltrasi (Encoder)	Error	Error (%)
1.	6,00	5,76	-0,24	-0,04
2.	6,00	4,32	-1,68	-0,28
3.	4,80	4,32	-0,48	-0,1
4.	4,80	7,20	2,40	0,5
5.	4,80	4,32	-0,48	-0,1
6.	3,60	4,32	0,72	0,2
7.	3,60	4,32	0,72	0,2
8.	3,60	4,32	0,72	0,2
9.	2,40	2,88	0,48	0,2
10.	2,40	2,88	0,48	0,2
11.	2,40	4,32	1,92	0,8
12.	2,40	2,88	0,48	0,2
Rata-rata			0,42	0,165

Sumber: Data Diolah

Tabel 7. Analisis MAE dan RMSE

$ e $	e^2
0,24	0,06
1,68	2,82
0,48	0,23
2,4	5,76
0,48	0,23
0,72	0,52
0,72	0,52
0,72	0,52
0,48	0,23
0,48	0,23
1,92	3,69
0,48	0,23

Sumber: Data Diolah

Tabel 8. Analisis MAE dan RMSE

Metrik	Nilai (cm/jam)
Mean Absolute Error (MAE)	0,90
Root Mean Squared Error (RMSE)	1,12

Sumber: Data Diolah

Nilai *error absolut* dan kuadrat *error* dari selisih antara hasil pengukuran laju infiltrasi alat digital terhadap metode manual ditunjukkan pada (Tabel 6). Nilai *error absolut* digunakan untuk analisis *Mean Absolute Error (MAE)*, yang merepresentasikan rata-rata besar penyimpangan tanpa memperhatikan arah selisih. Nilai *error* kuadrat digunakan untuk analisis *Root Mean Square Error (RMSE)*, yang memberi bobot lebih besar terhadap *error* yang ekstrem. Hasil analisis MAE dan RMSE ditunjukkan pada (tabel 8), didapatkan hasil analisis $MAE = 0,9$ cm/jam menunjukkan bahwa rata-rata penyimpangan hasil pengukuran alat digital terhadap metode manual tergolong kecil dan hasil analisis RMSE sebesar 1,12 cm/jam menggambarkan adanya *error* yang sedikit lebih tinggi dibandingkan nilai MAE akibat pemberian bobot lebih besar terhadap *error* yang ekstrem. Perbedaan inimenandakan bahwa sebagian besar penyimpangan masih berada dalam rentang yang wajar. RMSE yang mendekati MAE juga menunjukkan bahwa alat tidak memiliki banyak kesalahan besar yang menyimpang jauh dari nilai sebenarnya.

Analisis Fluktuasi dan Stabilitas Sistem

Meskipun grafik laju infiltrasi digital menunjukkan sedikit titik pada interval waktu tertentu (Gambar 8), hal ini merupakan representasi dari sensor sensitivitas terhadap pergerakan fisik air di dalam ring. Pada metode manual, rahang kecil ini sering kali "terhaluskan" secara subjektif oleh pembacaan manusia yang cenderung membulatkan angka. Dengan demikian, sistem otomatis justru memberikan data yang lebih akurat terhadap kondisi dinamika air di lapangan. Penggunaan bahan *baja tahan karat 304* juga terbukti menjaga kestabilan alat terhadap korosi dan tekanan tanah, menjamin umur pakai alat yang lebih lama bagi kelompok tani atau balai penyuluhan.

SIMPULAN

Berdasarkan hasil perancangan, pengujian, dan analisis data, dapat disimpulkan bahwa sistem otomasi *double ring infiltrrometer* berbasis ESP8266 dan *absolute rotary encoder* telah berhasil dikembangkan dan memiliki performa yang sangat baik sebagai alat ukur digital di lapangan. Beberapa point yang dapat diuraikan dalam simpulan adalah 1. Sistem ini memiliki tingkat akurasi yang setara dengan metode manual, dengan nilai koefisien determinasi (R^2) kalibrasi sebesar 0,9961. Hasil uji lapangan menunjukkan rata-rata *error* yang sangat rendah, yaitu sebesar 0,42 cm/jam (persentase *error* 0,17%). Dengan nilai MAE 0,90 cm/jam dan RMSE 1,12 cm/jam, alat ini dinyatakan sangat layak dan reliabel untuk menggantikan peran penggaris manual dalam pengukuran laju infiltrasi tanah. 2. Penggunaan alat ini memberikan efisiensi kerja yang signifikan bagi penyuluh atau petugas lapangan. Secara langsung, alat ini mereduksi beban kerja fisik melalui sistem pencatatan otomatis (*data logging*) ke dalam kartu microSD dalam format .csv. Penyuluh tidak perlu lagi melakukan pengamatan visual terus-menerus selama proses pengukuran, sehingga risiko kesalahan manusia (*human error*) dan bias pembacaan dapat dihilangkan sepenuhnya. Integrasi modul GPS dan RTC juga secara otomatis melampirkan data lokasi dan waktu presisi pada laporan digital. 3. Secara jangka panjang, alat ini mendukung modernisasi sarana penyuluhan menuju Pertanian 4.0. Ketersediaan data infiltrasi yang akurat dan mudah diolah memudahkan penyuluh dalam memberikan rekomendasi irigasi dan konservasi lahan yang lebih presisi kepada petani. Selain itu, sifat perangkat yang berbiaya rendah (*low-cost*) dan portabel memungkinkan teknologi ini direplikasi secara luas oleh balai penyuluhan atau kelompok tani guna meningkatkan kualitas perencanaan usahatani berbasis data lapangan yang valid.

DAFTAR PUSTAKA

Andini, F. P., Andriani, T., Ariyanto, N., & Topan, P. A. (2024). Rancang Bangun Kandang Ayam Pedaging Cerdas Otomatis Berbasis Mikontroler ESP32 dan Aplikasi Blynk IOT. *Jurnal Informatika Teknologi dan Sains*, 6(3), 595–604.

- Arbaningrum, R., Subagyo, G. W., & Resdiansyah. (2022). Analisis Laju Infiltrasi pada Ruang Terbuka Hijau yang Terbatas di Pemukiman Perkotaan. *Jurnal Teknik Sipil: Rancang Bangun*, 8(1), 104–108.
- Chen, L., Wang, Y., & Zhao, X. (2022). Development of an IoT-Based Soil Infiltration Monitoring System Using ESP32. *Sensors*, 22(3), 1054. <https://doi.org/10.3390/s22031054>.
- Espinoza, R., Fuster, R., Zambrano-Bigiarini, M., & Rivera, C. (2021). Low-Cost Automated Soil Moisture and Infiltration Monitoring System. *Journal of Hydrology*, 593, 125-134. <https://doi.org/10.1016/j-jhydrol.2020.125867>.
- Fahmida, A. (2023). Pentingnya Data Infiltrasi dalam Perencanaan Irigasi Presisi. *Jurnal Irigasi Terapan*, 4(1), 12-18.
- FAO. (2022). *The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture 2021: Systems at reaking point. Synthesis report 2021*. Rome: FAO. <https://doi.org/10.4060/cb7645en>.
- Faridah, S. N., Achmad, M., & Useng, D. 2023. Desain Teknik Irigasi dan Drainase pada Lahan Pertanian. *Jurnal Sumber Daya Air*, 15(2), 45-56.
- Fatehnia, M., Paran, S., Kish, S., & Tawfiq, K. (2016). Automating Double Ring Infiltrometer with an Arduino Microcontroller. *Geoderma*, 262, 133–139. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.08.022>.
- Hidayat, M., Djufti, D. J., Basril H., Ismail N., Idroes R., & Ikhwal F. M. (2024). Influence of Vegetation Type on Infiltration Rate and Capacity at Ie Jue Geothermal Manifestation, Mount Seulawah Agam, Indonesia. *J. Hellyon*, 10, 25783.
- Imran, A., Kartika, K., Daud, M., & Asran, A. (2022). Jam Digital Berbasis RTC DS12C887. *Jurnal Energi Elektrik*, 11(1), 1-8. <https://doi.org/10.29103/jee.v11i1.7514>.
- IPCC. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report.
- Jones, M., & Smith, A. (2023). Real-Time Hydrological Monitoring for Adaptive Water Management. *Water Resources Research*, 59(1), e2022WR031234.
- Kumar, S., Alam, N. M., & Krishna, B. (2020). Automated Infiltration Measurement System: Design and Field Evaluation. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(4), 234.
- Lee, K., Gu, T., and Bang, Y. (2020). Measurement and Compensation of Errors in Absolute Encoder using Dual Absolute Encoder System. *Microsystem Technologies*, 26(11), 3469–3476. <https://doi.org/10.1007/s00542-020-04925-3>.
- Nabila, S., & Nursusanto, I. (2024). Analisis Akurasi dan Validasi Sensor Digital dalam Pengukuran Parameter Hidrologi Tanah. *Jurnal Teknik Pertanian Lampung*, 13(2), 112-125. <https://doi.org/10.23960/jtep-l.v13i2>.
- Reynolds, W. D., & Elrick, D. E. (2018). Infiltration Theory for Hydrologic Applications. *Soil Science Society of America Journal*, 82(3), 721-728.

- Smith, J., Amoozegar, A., McLaughlin, R. A., & Heitman, J. L. 2019. Challenges in manual Infiltration Measurement and the Need for Automation. *Hydrological Processes*, 33(12), 1700-1710. <https://doi.org/10.1002/hyp.13432>.
- Supriyo, B., Sihono, S., Utomo, K., & Krishna, B. (2024). Rancang Bangun Alat Pengubah RPM dari Pulsa Encoder ke Tegangan. *Orbith: Majalah Ilmiah Pengembangan Rekayasa dan Sosial*, 20(2), 127-133.