

Analisis Akurasi dan Stabilitas Sensor Kelembapan Tanah Kapasitif V1.2 dan V2.0 terhadap Three Way Meter

Siti Nurhayati¹, Supriadi², Rihartanto³

^{1,2,3} Teknik Komputer, Politeknik Negeri Samarinda, Indonesia
Email: ¹nurh83082@gmail.com

Abstrak

Kelembapan tanah adalah faktor penting dalam mendukung pertumbuhan tanaman dan pengelolaan sistem irigasi. Pengukuran kelembapan secara otomatis bisa dilakukan menggunakan *Capacitive Soil Moisture sensor*, namun perbedaan versi modul memengaruhi akurasi pembacaan data. Penelitian ini bertujuan menganalisis akurasi dan stabilitas *Capacitive Soil Moisture sensor* v1.2 dan v2.0 dengan menjadikan *Three Way Meter* analog sebagai instrumen acuan (*ground truth*). Metode eksperimen dilakukan melalui pengujian pada tiga fase tanah (kering, lembab, dan basah) dengan mengambil 30 sample data per fase secara repetitif yang dirata rata menjadi 10 titik observasi. Evaluasi performa diukur menggunakan parameter statistik *Mean Absolute Error* (MAE), *Root Mean Square Error* (RMSE), dan Standar Deviasi (SD). Hasil penelitian menunjukkan sensor v2.0 memiliki performa yang jauh lebih unggul dengan rata-rata nilai MAE sebesar 2,3%, RMSE 2,89%, dan SD 2,16%. Sebaliknya, sensor v1.2 mengalami galat signifikan pada kondisi tanah kering dengan MAE sebesar 27,00%, RMSE 27,00%, dan rata-rata SD total mencapai 14,98% akibat ketiadaan sistem regulasi tegangan. Penelitian ini memberikan kontribusi berupa rekomendasi teknis objektif dalam pemilihan komponen yang andal untuk mengoptimalkan efisiensi logika otomatisasi pada sistem irigasi pertanian presisi.

Kata kunci: *irigasi otomatis, kelembapan tanah, monitoring tanah, sensor kapasitif, stabilitas sinyal*

Abstract

Soil moisture is a crucial factor in supporting plant growth and managing irrigation systems. Automatic moisture measurement can be performed using Capacitive Soil Moisture sensors; however, differences between sensor versions can significantly impact the accuracy and stability of data acquisition. This study aims to analyze the accuracy and stability of the Capacitive Soil Moisture sensor v1.2 and v2.0 by employing an analog Three Way Meter as the ground truth. The experimental method was conducted through testing across three soil moisture phases (dry, moist, and wet) by acquiring 30 replicated data samples per phase, which were averaged into 10 primary observation points. Performance evaluation was measured using statistical parameters, including Mean Absolute Error (MAE), Root Mean Square Error (RMSE), and Standard Deviation (SD). The results indicated that the v2.0 sensor exhibited superior performance, achieving an average MAE of 2.33%, RMSE of 2.89%, and SD of 2.16%. Conversely, the v1.2 sensor demonstrated a significant error in dry soil conditions, resulting in an MAE of 27.00%, an RMSE of 27.00%, and a total average SD reaching 14.98% due to the absence of a voltage regulation system. This study contributes objective technical recommendations for selecting reliable components to optimize automation logic efficiency in precision agricultural irrigation systems.

Keywords: *automatic irrigation, capacitive sensor, signal stability, soil moisture, soil monitoring*

1. PENDAHULUAN

Penggunaan mikrokontroler untuk otomatisasi di sektor pertanian atau perkebunan skala kecil ini berkembang cukup pesat. Salah satu bentuk penerapan paling sering dikembangkan oleh kalangan mahasiswa dan praktisi adalah rancang bangun irigasi otomatis. Kesuksesan sistem ini sangat bergantung pada kemampuan perangkat keras untuk membaca parameter fisik lingkungan secara *real-time* menjadi kunci keberhasilan, terutama mengenai takaran kadar air di dalam tanah. Apabila tanah terlalu kering, bisa menyebabkan tanaman kekurangan nutrisi dan layu. Sebaliknya, kelebihan air irigasi berisiko merusak sistem perakaran akibat pembusukan. Oleh karena itu, keberadaan sensor

pembaca kelembapan tanah yang presisi sangat dibutuhkan agar aktuator seperti *relay* dan pompa air dapat bekerja di waktu yang tepat (Mus Muallim & Mustamin, 2026).

Pada tahap awal perkembangannya, pengukur kelembapan tanah didominasi oleh penggunaan sensor tipe resistif yang bekerja berdasarkan prinsip konduktivitas listrik. Namun, praktik dilapangan menunjukkan bahwa sensor resistif memiliki kelemahan mendasar berupa kerentanan terhadap korosi akibat proses elektrolisis saat *probe* logam bersentuhan langsung dengan media tanam yang basah. Sebagai solusi dari kendala daya tahan tersebut, penggunaan sensor kapasitif menjadi standar baru dalam perancangan perangkat keras pertanian karena sifatnya yang anti-karat. Sensor ini bekerja dengan mendeteksi perubahan nilai dielektrik tanah (kapasitansi) dan tidak mengukur resistansi listrik. Selain itu, sensor dilengkapi dengan lapisan kedap air (*solder mask*) yang melindungi sirkuit tembaga sehingga meningkatkan umur pakai perangkat (Marwanto et al., 2026).

Saat ini, terdapat dua varian sensor kapasitif yang sangat populer, yaitu versi 1.2 (v1.2) dan versi 2.0 (v2.0). Perbedaan mendasar antara kedua modul ini terletak pada arsitektur pengondisi sinyalnya. Sensor v1.2 menggunakan sirkuit pewaktu dasar berbasis chip timer NE555 tanpa adanya regulator tegangan khusus pada papan sirkuitnya. Akibatnya, sinyal keluaran analog sangat sensitif terhadap fluktuasi tegangan input dari mikrokontroler. Sementara itu, sensor v2.0 telah mengalami pembaruan sirkuit dengan mengintegrasikan IC Voltage Regulator TL431. Komponen ini berfungsi mengunci tegangan referensi internal agar tetap konstan, sehingga meminimalisir *noise* fluktuasi dan meningkatkan lineritas pembacaan meskipun terdapat penurunan atau lonjakan daya pada mikrokontroler. Pengembangan sistem sering kali menghadapi kendala berupa ketidakstabilan data analog atau munculnya *noise* yang tinggi. (Muhammad et al., 2025).

Beberapa penelitian sebelumnya telah banyak membahas mengenai teknik kalibrasi sensor kelembapan tanah menggunakan berbagai metode untuk meningkatkan akurasi pembacaan. Namun, penelitian yang secara khusus melakukan uji komparasi langsung antara modul kapasitif v1.2 dan v2.0 dengan melibatkan alat ukur manual sebagai pembanding masih sangat terbatas. Sebagian besar studi hanya berfokus pada penggunaan satu jenis sensor tanpa mempertimbangkan pengaruh perbedaan arsitektur rangkaian terhadap stabilitas sinyal analog yang dihasilkan (Umbu, 2023). Investigasi langsung yang membandingkan dampak arsitektur kelistrikan sirkuit secara spesifik terhadap akurasi serta stabilitas data analog pembacaan parameter kelengasan tanah dengan melibatkan instrumen lapangan yang masih sangat terbatas.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk melakukan analisis komparatif terhadap kinerja sensor kapasitif soil moisture v1.2 dan v2.0. Pengujian dilakukan dengan mengintegrasikan kedua sensor pada mikrokontroler Arduino Uno dan memvalidasi hasilnya menggunakan alat ukur analog *Three Way Meter* sebagai acuan utama atau *ground truth*. Penggunaan *Three Way Meter* dipilih karena alat ini umum digunakan oleh praktisi lapangan serta kemampuannya dalam memberikan skala pengukuran yang konsisten untuk proses perbandingan data (Surya Ramadhan et al., 2023).

Nilai kebaruan dari penelitian ini terletak pada penyajian data kuantitatif terkait tingkat kesalahan (*error rate*) dan karakteristik stabilitas sinyal dari masing-masing versi sensor pada berbagai kondisi tanah. Hasil dari analisis ini diharapkan dapat memberikan rekomendasi teknis yang objektif bagi para perancang sistem dalam memilih komponen sensor yang paling optimal. Dengan demikian, kesalahan pembacaan data yang berpotensi mengganggu logika otomatisasi sistem dapat diminimalisir sejak tahap perancangan perangkat keras (Samsul et al., 2022).

2. METODE PENELITIAN

Metode eksperimen dengan analisis kuantitatif digunakan dalam penelitian ini. Tahapan-tahapan yang dilalui meliputi perancangan sistem perangkat keras, kalibrasi pada komponen sensor, dan pengambilan data lapangan dengan berbagai tingkat kelembapan tanah. Hal ini dilakukan demi mendapatkan hasil pengukuran yang akurat serta memenuhi kaidah pertanggungjawaban ilmiah.

2.1. Perancangan Perangkat Keras

Perancangan arsitektur sistem merupakan tahapan pertama dalam penelitian ini, dengan menggunakan Arduino Uno R3 sebagai pengendali logika utama dalam pembacaan sinyal. Proses merancang komponen ini difasilitasi menggunakan papan sirkuit sementara (*breadboard*) dan kabel penghubung (*jumper*) agar pengujian tersebut dapat di evaluasi tanpa melalui proses penyolderan. Guna membandingkan performa, sensor kelembapan tanah kapasitif tipe v1.2 dan v2.0 dipasang pada pin input analog secara paralel agar transmisi data berlangsung serempak. Penelitian ini mengadopsi alat ukur *Three Way Meter* berbasis analog sebagai instrumen kalibrator primer untuk memperoleh data pembanding yang akurat . (Haq et al., 2024; Pratama & Setiawan, 2021). Pemilihan *Three Way Meter* analog sebagai acuan utama (ground truth) didasarkan pada aplikasinya yang luas oleh praktisi pertanian dilapangan, kemudahan mekanis tanpa interferensi daya eksternal, serta kemampuannya memberikan skala pengukuran kelengasan yang konsisten pada kondisi tanah riil.

Spesifikasi dari masing-masing komponen perangkat yang dilibatkan dalam eksperimen ini diuraikan secara rinci pada Tabel 1.

Tabel 1. Perancangan Perangkat Keras

| No | Nama Perangkat | Spesifikasi | Fungsi |
|----|------------------------|----------------------------|--|
| 1 | Arduino Uno R3 | IC ATmega328P, 10-bit ADC | Pusat komputasi dan akuisisi data analog |
| 2 | Sensor Kapasitif v1.2 | Chip Timer NE555 | Modul sensor uji pertama (tanpa penstabil tegangan) |
| 3 | Sensor Kapasitif v2.0 | IC Regulator TL431 | Modul sensor uji kedua (dengan komponen <i>regulator</i>) |
| 4 | <i>Three Way Meter</i> | Skala Analog Moisture 1-10 | Alat ukur acuan mutlak untuk validasi di lapangan |

Implementasi fisik dari perancangan sistem dilakukan dengan merangkai seluruh komponen utama pada sebuah *breadboard* sebagai jalur distribusi daya. Pada Gambar 1, terlihat sensor kapasitif varian v1.2 dan v2.0 dihubungkan secara paralel ke pin input Arduino Uno R3.

Konfigurasi ini memungkinkan mikrokontroler untuk melakukan akuisisi data secara simultan dari kedua sensor dalam kondisi lingkungan yang identik. Kabel *jumper* digunakan untuk menghubungkan pin VCC dan GND dari kedua sensor ke jalur catu daya 5V pada Arduino, sementara pin output analog masing-masing sensor diarahkan ke pin A0 dan A1 untuk diproses lebih lanjut.



Gambar 1. Implementasi Fisik Rangkaian Sistem Komparasi Sensor Kapasitif V1.2 dan V2.0

2.2. Prosedur Kalibrasi Instrumen

Tahapan krusial selanjutnya dalam penelitian ini adalah formulasi prosedur kalibrasi untuk akurasi pembacaan instrumen. Mengingat mekanisme *Analog-to-Digital Converter* (ADC) pada mikrokontroler hanya mempresentasikan fluktuasi tegangan ke dalam rentang nilai diskrit 0 hingga 1023, maka diperlukan transformasi data ke dalam bentuk persentase kelembapan. Proses kalibrasi ini dilakukan dengan menetapkan dua titik referensi ekstrem sebagai berikut :

- Kalibrasi Batas Minimum (0%) : Sensor diposisikan pada kondisi udara terbuka menjadi kering tanpa kontak fisik dengan medium apapun guna mengidentifikasi nilai ambang bawah dari kelembapan.
- Kalibrasi Batas Maksimum (100%) : Sensor dimasukkan ke dalam media air hingga batas proteksi komponen (solder mask) untuk menentukan nilai saturasi atau tingkat atas kelembapan tanah.

Batas minimum (0% kelembapan di udara terbuka) menghasilkan nilai ADC sebesar 564 untuk sensor v2.0 dan 464 untuk sensor v1.2. Sedangkan batas maksimum (100% kelembapan dalam media air) menghasilkan nilai ADC sebesar 206 untuk sensor v2.0 dan 179 untuk sensor v1.2. Logika konversi yang diperoleh dari kedua titik ekstrem tersebut diintegrasikan menggunakan fungsi matematis `map()` dalam ekosistem arduino IDE (Hardiwiguna & Ramdhani Nugraha, 2024). Secara simultan, untuk sinkronisasi parameter ukur, skala defleksi jarum pada *Three Way Meter* (skala 1-10) dikonversikan melalui faktor multiplikasi sepuluh sehingga selaras dengan representasi rentang persentase 0-100% (Priyono & Triadyaksa, 2020)

2.3. Protokol Pengambilan Data Eksperimen

Prosedur akuisisi data dilakukan dengan menempatkan ketiga *probe* instrumen pengukuran secara simultan pada suatu wadah pot media tanam. Guna meminimalisir potensi interferensi sinyal elektromagnetik antar perangkat, diatur jarak antar probe sebesar ± 5 sentimeter. Pengamatan dilakukan secara sistematis yang diklasifikasikan ke dalam tiga skenario kondisi tanah sebagai berikut:

- Fase Tanah Kering: Media tanam dibiarkan tanpa pemberian asupan air selama 72 jam guna mencapai tingkat kelengasan minimal.
- Fase Tanah Lembab: Media tanam disiram dengan takaran kurang lebih 100 ml, diikuti dengan periode stabilisasi untuk memastikan air meresap dengan sempurna.
- Fase Tanah Basah: Penambahan debit air dalam volume signifikan (sekitar 250 ml) hingga media mencapai titik jenuh air atau konsistensi berlumpur.

Dalam setiap fase pengujian, pengambilan data dilakukan sebanyak 30 kali perulangan (sampel) dengan interval pencuplikan (*sampling rate*) setiap 2 detik. Nilai dari 30 sampel tersebut kemudian dirata-rata untuk menghasilkan 10 titik observasi utama untuk dianalisis pada serial monitor. Metode observasi berulang ini bertujuan untuk menganalisis stabilitas tegangan keluaran, fluktuasi sinyal, serta konsistensi performa dari tiap varian sensor secara objektif dan terukur (Amanda & Yusman, 2025).

2.4. Arsitektur Logika Sistem

Urutan logika operasional divisualisasikan melalui diagram alir, yang menguraikan tahapan komputasi ini dari inisiasi perangkat keras hingga akuisisi data akhir. Sistem memulai siklusnya dengan konfigurasi pin analog Arduino Uno, disusul pembacaan nilai tegangan diskrit (*Analog-to-Digital Converter*) secara simultan dari sensor kapasitif varian v1.2 dan v2.0 pada media tanam. Nilai ADC tersebut kemudian dikonversi menjadi representasi persentase (0-100%) melalui algoritma matematis berdasarkan parameter kalibrasi yang telah ditetapkan. Secara sinkron, hasil pengukuran *Three Way Meter* didokumentasikan sebagai variabel referensi (*ground truth*).

Seluruh parameter dari ketiga instrumen yang telah terekstrasi kemudian direkam melalui serial monitor. Guna mengevaluasi keandalan sensor secara komprehensif, tingkat kesalahan dan kestabilan data diuji menggunakan empat parameter statistik, yaitu *Mean Absolute Error* (MAE), *Root Mean Square Error* (RSME), Standar Deviasi (SD), dan Persentase Error. Kombinasi keempat metrik

pengujian statistik pada umumnya diimplementasikan untuk mengukur performa linearitas dan tingkat presisi dari modul sensor berbasis Internet of Things (Februariyanti et al., 2025). Penerapan rangkaian metrik evaluasi ini sangat krusial dalam fase pengujian perangkat keras untuk memvalidasi tingkat akurasi serta presisi linearitas sensor sebelum diintegrasikan secara luas pada arsitektur sistem otomatisasi. Di samping itu, pengujian akurasi berbasis metrik *Mean Absolute Error* (MAE) penting dilakukan guna mengukur seberapa jauh deviasi atau perbedaan nilai hasil pembacaan sensor dengan instrumen acuan yang digunakan di lapangan (Mualfah et al., 2023). Persamaan matematis yang digunakan adalah sebagai berikut :

1. Persentase Error (% Error)

$$Error \% = \frac{|y_i - \hat{y}_i|}{\hat{y}_i} \times 100\%$$

Digunakan untuk mengukur besarnya kesalahan relatif pembacaan sensor pada tiap-tiap titik kondisi terhadap nilai acuan standar

2. *Mean Absolute Error* (MAE)

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|$$

Digunakan untuk mengukur rata-rata keseluruhan kesalahan absolute antara nilai pembacaan sensor dan alat referensi.

3. *Root Mean Square Error* (RMSE)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}$$

Digunakan untuk mengevaluasi sensitivitas kesalahan sistem dengan memberikan penalti bobot yang lebih besar pada deviasi yang masif.

4. Standar Deviasi (SD)

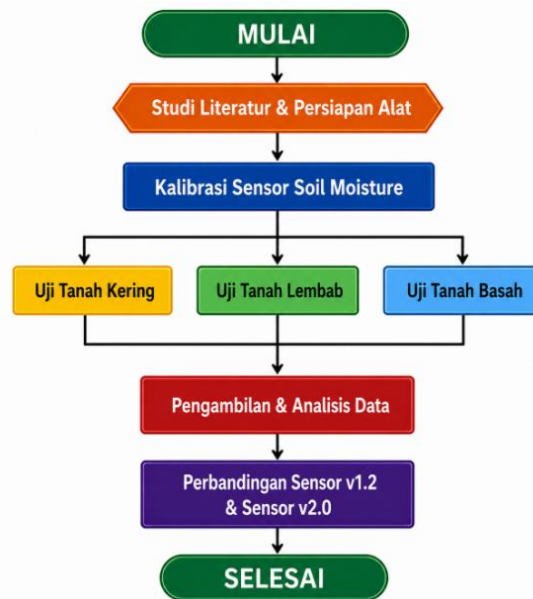
$$SD = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

Digunakan untuk mengukur tingkat persebaran data guna menganalisis kestabilan dan konsistensi fluktuasi sinyal analog pada sensor.

Keterangan Parameter :

- n = Jumlah kondisi fase pengujian (3 fase kelengkapan).
- y_i = Nilai persentase pembacaan Sensor Kapasitif (v1.2 dan v2.0)
- \hat{y}_i = Nilai persentase acuan mutlak dari *Three Way Meter*
- x_i = Nilai sampel data pembacaan sensor.
- \bar{x} = Nilai rata-rata (*mean*) dari total populasi data

Siklus komputasi dan kalkulasi galat ini berlangsung secara repetitif dengan interval sampling setiap 2 detik sesuai protokol pengujian.



Gambar 2. Flowchart Arsitektur Sistem

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini menyajikan hasil penelitian serta menganalisa komparasi kinerja antara Sensor Kapasitif Soil Moisture v1.2 dan v2.0. Parameter utama pada pengujian ini difokuskan pada tingkat akurasi pembacaan dan stabilitas sinyal tegangan keluaran yang diakuisisi oleh mikrokontroler Arduino Uno, dengan menjadikan instrumen analog *Three Way Meter* sebagai acuan mutlak (*ground truth*). Analisis dilakukan secara lengkap berdasarkan tiga kondisi kelengasan media tanam.

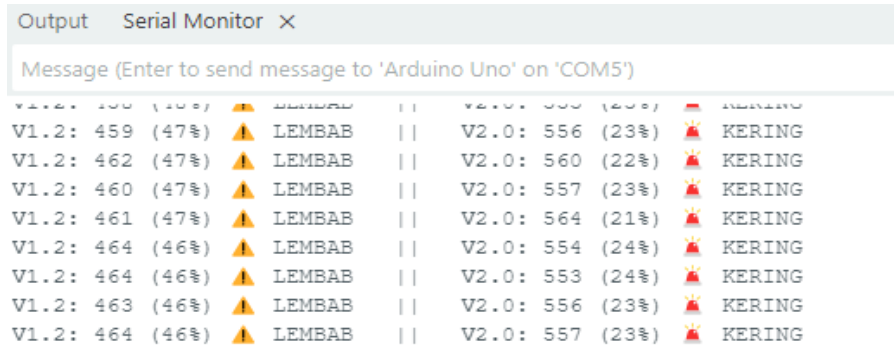
3.1. Hasil Pengujian

Pengujian dipenelitian ini dilakukan menggunakan media *topsoil* homogen seberat 500 gram yang sama untuk kedua sensor guna menjaga konsistensi parameter pengukuran terhadap tanah. Untuk memastikan validitas dan keandalan data, pengujian tidak dilakukan melalui pencuplikan tunggal. Pengambilan data dieksekusi sebanyak 30 kali perulangan (sampel) pada masing-masing fase kelembapan tanah (kering, lembab, dan basah), sehingga menghasilkan total 10 titik observasi. Nilai pembacaan sensor secara keseluruhan berada pada rentang analog 0 – 1023. Penelitian ini menggunakan nilai ambang batas (*threshold*) sebesar 500 sebagai klasifikasi utama; nilai di atas 500 merepresentasikan kondisi tanah kering, sedangkan nilai di bawah menunjukkan kondisi tanah lembab ataupun basah. Seluruh angka hasil nilai pembacaan yang diperlihatkan pada sub-bab berikut merupakan representasi nilai rata-rata (*mean*) dari populasi 10 sampel di setiap fasenya.

3.1.1. Hasil Kondisi Tanah Kering

Pada kondisi ini, tanah langsung diuji tanpa dicampurkan dengan air. Berdasarkan hasil pengujian menggunakan *Three Way Meter*, sensor v2.0 menghasilkan nilai yang berada di atas sekitar 553 -564 dengan persentase 21%-24%. Nilai ini menunjukkan jika sensor mampu mendeteksi kondisi tanah kering dengan sangat baik.

Sebaliknya, sensor v1.2 menunjukkan hasil yang tidak akurat, dengan nilai ADC yang berada pada 459 – 464 dan dipersentasekan 46 – 47%. Akibatnya, sistem salah mendeteksi kondisi tanah yaitu “LEMBAB“, yang berada di ambang batas tanah kering. Hal ini menunjukkan terjadinya galat pembacaan pada sensor v1.2 yang mengidentifikasi kondisi kering sebagai kondisi lembab.

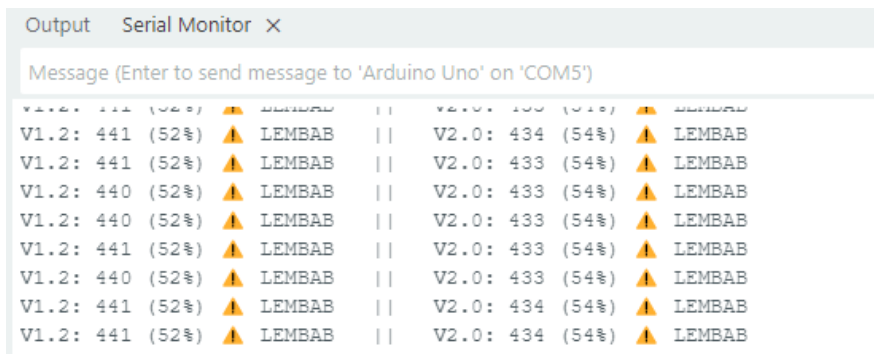


| Sensor | Value | Percentage | Status |
|--------|-------|------------|--------|
| V1.2 | 459 | (47%) | LEMBAB |
| V1.2 | 462 | (47%) | LEMBAB |
| V1.2 | 460 | (47%) | LEMBAB |
| V1.2 | 461 | (47%) | LEMBAB |
| V1.2 | 464 | (46%) | LEMBAB |
| V1.2 | 464 | (46%) | LEMBAB |
| V1.2 | 463 | (46%) | LEMBAB |
| V1.2 | 464 | (46%) | LEMBAB |
| V2.0 | 556 | (23%) | KERING |
| V2.0 | 560 | (22%) | KERING |
| V2.0 | 557 | (23%) | KERING |
| V2.0 | 564 | (21%) | KERING |
| V2.0 | 554 | (24%) | KERING |
| V2.0 | 553 | (24%) | KERING |
| V2.0 | 556 | (23%) | KERING |
| V2.0 | 557 | (23%) | KERING |

Gambar 3. Hasil dari Tanah Kering

3.1.2. Hasil Kondisi Tanah Lembab

Pengujian pada kondisi tanah lembab dilakukan dengan menambahkan air dalam jumlah jumlah yang sedang hingga tanah mencapai kondisi lembab. Hasil penelitian menunjukkan dari kedua sensor memberikan hasil kondisi yang sangat berbeda. Pada sensor v2.0 menghasilkan nilai yang lebih stabil dan sangat sesuai dengan kondisi dari tanah yaitu lembab sekitar 54% (ADC ±433). Sementara itu, untuk sensor v1.2 menunjukkan dalam pembacaan kondisi tanah sekitar 52% (ADC ±440). Kedua sensor berhasil mempertahankan status yaitu "LEMBAB".

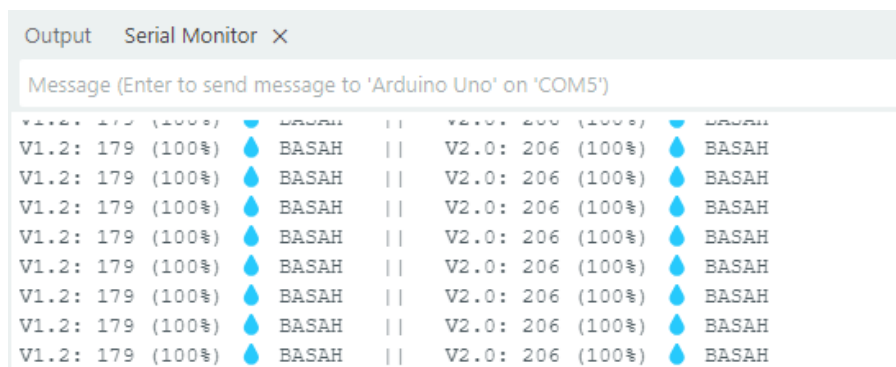


| Sensor | Value | Percentage | Status |
|--------|-------|------------|--------|
| V1.2 | 441 | (52%) | LEMBAB |
| V1.2 | 441 | (52%) | LEMBAB |
| V1.2 | 440 | (52%) | LEMBAB |
| V1.2 | 440 | (52%) | LEMBAB |
| V1.2 | 441 | (52%) | LEMBAB |
| V1.2 | 440 | (52%) | LEMBAB |
| V1.2 | 441 | (52%) | LEMBAB |
| V1.2 | 441 | (52%) | LEMBAB |
| V2.0 | 434 | (54%) | LEMBAB |
| V2.0 | 433 | (54%) | LEMBAB |
| V2.0 | 433 | (54%) | LEMBAB |
| V2.0 | 433 | (54%) | LEMBAB |
| V2.0 | 433 | (54%) | LEMBAB |
| V2.0 | 433 | (54%) | LEMBAB |
| V2.0 | 434 | (54%) | LEMBAB |
| V2.0 | 434 | (54%) | LEMBAB |

Gambar 4. Hasil dari Tanah Lembab

3.1.3. Hasil Kondisi Tanah Basah

Pada pengujian terhadap tanah basah tanah diberikan air dengan jumlah yang banyak hingga mencapai kondisi jenuh air (berlumpur). Hasil ini menunjukkan bahwa sensor v2.0 menghasilkan nilai ADC angka 206 dan untuk pembacaan sensor v1.2 menunjukkan nilai ADC angka 250, dari persentase kedua pembacaan sensor tersebut berhasil dibatasi pada angka 100%. Oleh karena itu, penelitian terhadap tanah yang menggunakan dua sensor yaitu v1.2 dan v2.0 menampilkan nilai yang akurat dengan status yaitu "BASAH".



| Sensor | Value | Percentage | Status |
|--------|-------|------------|--------|
| V1.2 | 179 | (100%) | BASAH |
| V1.2 | 179 | (100%) | BASAH |
| V1.2 | 179 | (100%) | BASAH |
| V1.2 | 179 | (100%) | BASAH |
| V1.2 | 179 | (100%) | BASAH |
| V1.2 | 179 | (100%) | BASAH |
| V1.2 | 179 | (100%) | BASAH |
| V1.2 | 179 | (100%) | BASAH |
| V2.0 | 206 | (100%) | BASAH |
| V2.0 | 206 | (100%) | BASAH |
| V2.0 | 206 | (100%) | BASAH |
| V2.0 | 206 | (100%) | BASAH |
| V2.0 | 206 | (100%) | BASAH |
| V2.0 | 206 | (100%) | BASAH |
| V2.0 | 206 | (100%) | BASAH |
| V2.0 | 206 | (100%) | BASAH |

Gambar 5. Hasil dari Tanah Basah

3.2. Pembahasan dan Analisis Komparatif

Data ekstraksi dari ketiga fase pengujian tersebut kemudian dikompilasi untuk menentukan tingkat selisih kesalahan (*error rate*). Kalkulasi simpangan data terhadap nilai asumsi acuan disajikan secara komprehensif pada Tabel 2.

Tabel 2. Perbandingan Hasil Pembacaan Sensor terhadap Kondisi Kelengasan Tanah

| Kondisi Tanah | Three Way Meter (Referensi) | Sensor v1.2 (Pembacaan) | Sensor v2.0 (Pembacaan) | Catatan |
|---------------|-----------------------------|-------------------------|-------------------------|--|
| Kering | 20% | 47% | 23% | Sensor v1.2 <i>error</i> besar (terbaca lembab), v2.0 akurat |
| Lembab | 50% | 52% | 54% | Kedua sensor cukup akurat dalam membaca kondisi |
| Basah | 100% | 100% | 100% | Kedua sensor menunjukkan nilai saturasi maksiman yang sesuai |

Berdasarkan Tabel 2, terlihat bahwa penyimpangan paling kritis terjadi pada fase tanah kering. Untuk mengetahui besarnya nilai simpangan tersebut secara riil, dilakukan kalkulasi nilai selisih atau galat (*error rate*) positif dan negatif dari masing-masing varian sensor yang dimuat dalam Tabel 3.

Tabel 3. Deviasi Nilai Pembacaan Sensor terhadap Alat Referensi

| Kondisi Tanah | Nilai Referensi | Sensor v1.2 (Pembacaan) | Deviasi v1.2 | Sensor v2.0 (Pembacaan) | Deviasi v2.0 |
|---------------|-----------------|-------------------------|--------------|-------------------------|--------------|
| Kering | 20% | 47% | +27% | 23% | +3% |
| Lembab | 50% | 52% | +2% | 54% | +4% |
| Basah | 100% | 100% | 0% | 100% | 0% |

Melalui data deviasi pada Tabel 3, evaluasi kinerja sensor diperdalam menggunakan pendekatan uji statistik parametrik. Pengujian dilakukan menggunakan metode *Mean Absolute Error* (MAE) untuk melihat rata-rata kesalahan absolute, serta *Root Mean Square Error* (RMSE, serta Standar Deviasi (SD) untuk mengukur konsistensi dan tingkat stabilitas fluktuasi sinyal analog pada masing-masing sensor (Darmawan et al., 2020), seperti yang ditunjukkan Tabel 4.

Tabel 4. Analisis Perhitungan Parameter Error Statistik Performa Sensor

| Kondisi Tanah | MAE v1.2 | RMSE v1.2 | MAE v2.0 | RMSE v2.0 | Catatan |
|---------------|----------|-----------|----------|-----------|--|
| Kering | 27.00% | 27.00% | 3.00% | 3.00% | Sensor v1.2 kesalahan klasifikasi pembacaan, v2.0 sangat akurat. |
| Lembab | 2.00% | 2.00% | 4.00% | 4.00% | Kedua sensor memiliki tingkat galat yang rendah |
| Basah | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | Kedua sensor bekerja optimal pada kondisi jenuh air |
| Rata-rata | 9.67% | 15.63% | 2.33% | 2.89% | Sensor v2.0 secara statistik jauh lebih unggul |

Hasil pengujian komprehensif pada Tabel 4 membuktikan secara kuantitatif bahwa sensor v2.0 memiliki tingkat akurasi dan stabilitas yang jauh lebih unggul disetiap fase pengujian. Lonjakan nilai rata-rata RMSE (15.63%) serta Standar Deviasi yang menyentuh angka 14.98% pada sensor v1.2

mengonfirmasi adanya kelemahan arsitektur kelistrikan yang fatal pada modul versi lama tersebut. Tingginya nilai Standar Deviasi mengindikasikan bahwa sebaran data analog sensor v1.2 sangat fluktuatif dan rentan terhadap *noise* (Hardiwiguna & Ramdhani Nugraha, 2024).

Secara teknis, ketidakstabilan pembacaan sensor v1.2 pada kondisi tanah kering (dengan deviasi mencapai +27%) disebabkan oleh arsitektur sirkuit tanpa regulasi tegangan yang membuat pelat kapasitor rentan menyimpan residu muatan (*residual charge*) saat media berubah dari basah ke kering. Sebaliknya, sensor v2.0 terbukti sangat stabil dengan mereduksi nilai rata-rata MAE hingga 2.33%, RMSE 2.89%, dan Standar Deviasi 2.16%. Konsistensi ini dicapai karena integrasi IC Regulator TL431 pada sensor v2.0. Secara teori elektronika, TL431 bertindak sebagai *shunt regulator* yang menjaga tegangan referensi internal tetap konstan (Dengak et al., 2026). Hal ini memastikan fluktuasi impedansi atau riak tegangan (*voltage ripple*) dari mikrokontroler tidak mengganggu pembacaan konversi nilai analog ke digital. (Dengak et al., 2026). Sebagai ringkasan dari seluruh aspek fungsional fisis yang diamati selama eksperimen, Tabel 5 menyajikan komparasi karakteristik fungsional kedua sensor.

Tabel 5. Ringkasan Perbandingan Karakteristik Kinerja Eksperimental Sensor

| Parameter Kinerja | Sensor Kapasitif v1.2 | Sensor Kapasitif v2.0 | Catatan Kesimpulan |
|---------------------|--|--|----------------------------|
| Akurasi | Rendah pada kondisi kering, cukup baik pada basah. | Tinggi dan konsisten di seluruh fase pengujian. | Sensor v2.0 lebih stabil. |
| Stabilitas Sinyal | Fluktuatif, rentan terhadap muatan residu. | Sangat stabil berkat regulasi daya internal. | Sensor v2.0 unggul. |
| Nilai Galat (Error) | Besar pada kondisi kering (misclassification) | Rendah dan minimal di semua kondisi uji. | Sensor v2.0 lebih akurat. |
| Keandalan | Kurang direkomendasikan untuk irigasi otomatis | Konsisten dengan alat acuan untuk otomatisasi pertanian. | Sensor v2.0 lebih optimal. |

Melalui visualisasi data kuantitatif yang terstruktur pada rangkaian tabel di atas, pembenahan arsitektur kelistrikan berupa penstabil tegangan terbukti memberikan dampak signifikan terhadap penurunan tingkat kesalahan sinyal analog. Temuan empiris ini menegaskan bahwa Capacitive Soil Moisture Sensor v2.0 memiliki performa yang jauh lebih unggul dan konsisten dibandingkan dengan varian v1.2, sehingga konsisten dengan alat acuan untuk diimplementasikan pada aplikasi pemantauan kelembapan tanah dan sistem otomatisasi pertanian presisi.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian eksperimental, dapat disimpulkan bahwa *Capacitive Soil Moisture Sensor* varian v2.0 memiliki tingkat akurasi dan stabilitas yang jauh lebih baik dibandingkan varian v1.2. Integrasi IC Voltage Regulator TL431 pada sensor v2.0 terbukti efektif mengunci tegangan referensi internal dan mereduksi fluktuasi sinyal analog akibat *noise*. Hal ini didukung oleh hasil uji statistik parameter galat (MAE dan RMSE) serta Standar Deviasi sensor v2.0 yang jauh lebih rendah dan konsisten diseluruh fase kelengasan tanah dibandingkan sensor v1.2 yang mengalami deviasi besar pada kondisi tanah kering. Oleh karena itu, modul v2.0 direkomendasikan sebagai komponen utama untuk sistem monitoring kelembapan tanah dan irigasi otomatis. Untuk penelitian selanjutnya, disarankan melakukan pengujian dengan variasi jenis tanah yang berbeda (seperti tanah pasir atau lempung) serta pengujian pada variasi kedalaman pemasangan sensor guna melihat konsistensi performa sensor dibawah kondisi lingkungan yang lebih kompleks.

DAFTAR PUSTAKA

- Amanda, L.-, & Yusman, Y.-. (2025). Perancangan Sistem Monitoring Kelembaban Tanah Berbasis Arduino Untuk Optimasi Kekeringan Pada Tanaman Hias. *Jurnal Informatika Dan Teknik Elektro Terapan*, 13(2). <https://doi.org/10.23960/jitet.v13i2.6475>
- Darmawan, I. G. E., Yadie, E., & Subagyo, H. (2020). Rancang Bangun Alat Ukur Kelembaban Tanah Berbasis Arduino Uno. *PoliGrid*, 1(1), 31. <https://doi.org/10.46964/poligrd.v1i1.215>
- Dengak, A., Bangkit, A., Umbu, S., Tarigan, J., & Warsito, A. (2026). Rancang Bangun Alat Ukur Portabel Berbasis Internet of Things (IoT) Untuk Pengukuran Suhu dan Kelembaban Udara Serta Tanah. 14(01), 80–95.
- Februariyanti, H., Khristianto, T., Jananto, A., & Nurraharjo, E. (2025). Analisis Sistem Kontrol Kelembaban Ruang Budidaya Berbasis ANFIS-IoT. *Journal of Telecommunication Electronics and Control Engineering (JTECE)*, 7(2), 119–133. <https://doi.org/10.20895/jtece.v7i2.1833>
- Haq, F. A., Pramuntadi, A., Wijaya, D. P., & Danianti, D. (2024). Perancangan Sistem Pemantauan Kelembaban Tanah, Kelembaban Udara, dan Suhu Udara pada Lahan Pembibitan Kakao Menggunakan Mikrokontroler Berbasis Internet of Things (Strudi Kasus: Pembibitan Efendi Farm). *Jurnal Teknik Industri Terintegrasi*, 7(3), 1882–1889. <https://doi.org/10.31004/jutin.v7i3.32153>
- Hardiwiguna, A., & Ramdhani Nugraha, A. (2024). Penentuan Kelembaban Tanah Menggunakan Metode Fuzzy Logic Dengan Capacitive Soil Moisture Sensor Dan Arduino Uno R3. *Jurnal Informatika Dan Teknik Elektro Terapan*, 12(3S1). <https://doi.org/10.23960/jitet.v12i3s1.5425>
- Marwanto, R., Maheswara Rivai, J., & Muhammad Wahyudi, H. (2026). Sistem Pertanian Cerdas Berbasis Iot Untuk Pemantauan Dan Penyiraman Tanaman Otomatis. 18(1).
- Mualfah, D., Sandi, G. H., & Fuad, E. (2023). Sistem Monitoring pH dan Kelembaban Tanah pada Tanaman Kacang Tanah Berbasis IoT. *Jurnal Aplikasi Teknologi Informasi Dan Manajemen (JATIM)*, 4(2), 138–147. <https://doi.org/10.31102/jatim.v4i2.2289>
- Muhammad, F., Muhammad, I., & Mukhsin, N. (2025). Penerapan Sensor Kelembaban Tanah Untuk Sistem Penyiraman Otomatis Pada Kebun Percobaan Fakultas Pertanian Berbasis Iot. 1–12.
- Mus Muallim, N., & Mustamin. (2026). Rancang Bangun Sistem Irigasi Cerdas Berbasis Sensor Kelembaban Tanah Dan Esp32 Untuk Efisiensi Air Pada Tanaman Padi. *Nucl. Phys.*, 13(1), 104–116. <https://www.preventionweb.net/news/preliminary-report-february-6-2023-earthquakes-turkiye>
- Pratama, M. K. N., & Setiawan, G. (2021). Rancang Bangun Sistem Pengontrol Kelembaban Tanah Pertanian Sayur Pakcoy dan Sawi. *Jurnal Otomasi Kontrol Dan Instrumentasi*, 13(2), 101–108. <https://doi.org/10.5614/joki.2021.13.2.5>
- Priyono, A., & Triadyaksa, P. (2020). Sistem penyiram tanaman cabai otomatis untuk menjaga kelembaban tanah berbasis esp8266. *Berkala Fisika*, 23(3), 91–100.
- Samsul, A., Neny, K., Reni, A., & Gabriela, E. (2022). Sistem Monitoring Kesuburan Lahan Pertanian menggunakan Sensor pH, Sensor Suhu, Intensitas Cahaya, dan Kelembaban Tanah Berbasis Internet of Things. *Jurnal Riset Fisika Indonesia*, 2(2), 26–30.
- Surya Ramadhan, I., Martias, M., Sastra, R., & Iqbal, M. (2023). Alat Penyiram Tanaman Otomatis Berbasis Arduino Uno Dan NodeMCU. *Insantek*, 4(1), 12–17. <https://doi.org/10.31294/instk.v4i1.2021>
- Umbu, A. B. S. (2023). Kalibrasi Sensor Kelembaban Tanah Yl-69 Untuk Sistem Pengukuran Kelembaban Tanah Berbasis Arduino Uno. *OPTIKA: Jurnal Pendidikan Fisika*, 7(1), 62–71. <https://doi.org/10.37478/optika.v7i1.2691>