

# IMPLEMENTASI SENSOR KELEMBAPAN DAN PH TANAH UNTUK OPTIMALISASI PERTUMBUHAN TANAMAN SELEDRI

Dedy Harto<sup>1</sup>, Kharis Hudaiby Hanif<sup>2</sup>, Farhan Muhammad Nabil<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>Universitas Borneo Tarakan, Kota Tarakan, Kalimantan Utara, Indonesia

<sup>1</sup>dedy@borneo.ac.id

<sup>2</sup>hudaiby21@borneo.ac.id

<sup>3</sup>farhan12nbl@gmail.com

**Abstract**— *Soil moisture and pH are important factors that influence the growth of celery (*Apium graveolens*). Manual monitoring of soil conditions is often ineffective because it cannot provide real-time soil condition information. This study aims to implement a sensor-based soil moisture and pH monitoring system to support the optimization of celery plant growth. The developed system uses a YL-96 soil moisture sensor and a soil pH sensor integrated with a microcontroller to measure and monitor soil conditions. Based on testing of 10 field data samples, the system is able to identify the "Moist and Normal" status with a high success rate. Data analysis shows the system has an accuracy of 90%, with only 10% of errors (1 in 10 data) caused by fluctuations in sensor readings. The results show that the developed system is able to monitor soil conditions in real-time so that it can be used as an aid in managing planting media to improve celery plant growth.*

**Keywords**— *Soil Moisture Sensor YL-96, Soil pH sensor, Soil Monitoring, Celery Plants.*

**Intisari**— Kondisi kelembapan dan tingkat keasaman (pH) tanah merupakan faktor penting yang mempengaruhi pertumbuhan tanaman seledri (*Apium graveolens*). Pemantauan kondisi tanah secara manual seringkali kurang efektif karena tidak dapat memberikan informasi kondisi tanah secara *real-time*. Penelitian ini bertujuan untuk mengimplementasikan sistem monitoring kelembapan dan pH tanah berbasis sensor untuk mendukung optimalisasi pertumbuhan tanaman seledri. Sistem yang dikembangkan menggunakan sensor kelembapan tanah tipe YL-96 dan sensor pH tanah yang diintegrasikan dengan mikrokontroler untuk melakukan pengukuran dan pemantauan kondisi tanah. Berdasarkan pengujian terhadap 10 sampel data lapangan, sistem mampu mengidentifikasi status "Lembab dan Normal" dengan tingkat keberhasilan yang tinggi. Analisis data menunjukkan sistem memiliki akurasi sebesar 90%, dengan hanya 10% error (1 dari 10 data) yang disebabkan oleh fluktuasi pembacaan sensor. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem yang dikembangkan mampu memantau kondisi tanah secara *real-time* sehingga dapat digunakan sebagai alat bantu dalam pengelolaan media tanam untuk meningkatkan pertumbuhan tanaman seledri.

**Kata Kunci**— *Sensor Kelembapan Tanah YL-96, Sensor pH Tanah, Monitoring Tanah, Tanaman Seledri.*

## I. PENDAHULUAN

Tanaman seledri (*Apium graveolens*) merupakan salah satu komoditas hortikultura yang memiliki nilai ekonomi tinggi dan banyak dimanfaatkan sebagai bahan pangan

serta tanaman obat. Pertumbuhan tanaman seledri sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan terutama kelembapan tanah dan tingkat keasaman (pH) tanah, karena kedua parameter tersebut menentukan ketersediaan unsur hara bagi tanaman. Ketidakseimbangan kadar air maupun pH tanah dapat menyebabkan pertumbuhan tanaman menjadi tidak optimal sehingga berdampak pada penurunan kualitas dan produktivitas hasil panen. Oleh karena itu, pemantauan kondisi tanah secara akurat menjadi faktor penting dalam budidaya tanaman seledri yang berkelanjutan [1].

Dalam praktik pertanian konvensional, pemantauan kondisi tanah umumnya masih dilakukan secara manual sehingga petani harus datang langsung ke lahan untuk mengecek kondisi tanah. Metode ini tidak hanya memerlukan waktu dan tenaga yang besar tetapi juga sering menghasilkan pengambilan keputusan yang kurang tepat karena keterbatasan data yang tersedia secara *real-time*. Perkembangan teknologi sensor dan Internet of Things (IoT) telah membuka peluang untuk mengembangkan sistem pemantauan tanah secara otomatis yang mampu mengukur parameter penting seperti kelembapan tanah, pH tanah, suhu, dan kondisi lingkungan lainnya secara berkelanjutan [2]. Sistem berbasis sensor ini memungkinkan pengumpulan data lingkungan secara *real-time* sehingga dapat membantu petani dalam mengambil keputusan yang lebih akurat terkait pengelolaan lahan dan irigasi.

Beberapa penelitian menunjukkan bahwa integrasi sensor tanah dengan sistem IoT dapat meningkatkan efisiensi penggunaan air serta mendukung penerapan *precision agriculture*. Sensor kelembapan tanah berperan penting dalam menentukan kebutuhan air tanaman sehingga irigasi dapat dilakukan secara lebih efisien dan sesuai dengan kebutuhan tanaman. Selain itu, sensor pH tanah juga digunakan untuk memantau tingkat keasaman tanah yang berpengaruh terhadap penyerapan unsur hara oleh tanaman. Pemantauan kedua parameter ini secara *real-time* dapat membantu mengoptimalkan kondisi lingkungan tanaman sehingga produktivitas pertanian dapat meningkat secara signifikan [3].

Penelitian terbaru juga menunjukkan bahwa sistem monitoring tanah berbasis IoT yang memanfaatkan sensor pH dan kelembapan tanah dapat membantu petani dalam mengelola kondisi tanah secara lebih efektif serta meningkatkan hasil pertanian. Sistem tersebut mampu mengirimkan data kondisi tanah secara otomatis ke platform monitoring sehingga pengguna dapat memantau

kondisi lahan secara jarak jauh. Dengan memanfaatkan teknologi ini, pengelolaan lahan pertanian dapat dilakukan secara lebih efisien, responsif, dan berbasis data [4]. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengimplementasikan sistem monitoring berbasis sensor kelembapan dan pH tanah guna mendukung optimalisasi pertumbuhan tanaman seledri melalui pemantauan kondisi tanah secara lebih akurat dan berkelanjutan..

## II. LANDASAN TEORI

### A. Tanaman Seledri

Seledri (*Apium Graveolens*) merupakan tanaman hortikultura yang banyak dimanfaatkan sebagai bahan pangan dan tanaman herbal. Pertumbuhan tanaman seledri sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan, khususnya kualitas tanah seperti kelembapan tanah dan tingkat keasaman (pH). Kondisi tanah yang tidak sesuai dapat menghambat penyerapan unsur hara sehingga mengurangi produktivitas tanaman. Oleh karena itu, pemantauan parameter tanah secara tepat menjadi faktor penting dalam meningkatkan kualitas dan hasil produksi tanaman hortikultura [1].

Dalam sistem pertanian modern, pengelolaan kondisi tanah dilakukan dengan pendekatan precision agriculture, yaitu memanfaatkan teknologi sensor untuk memantau kondisi lingkungan tanaman secara *real-time*. Pendekatan ini memungkinkan petani untuk menyesuaikan kebutuhan air dan nutrisi tanaman secara lebih akurat sehingga meningkatkan efisiensi penggunaan sumber daya dan produktivitas pertanian [5].

### B. Sensor Kelembapan Tanah

Sensor kelembapan tanah digunakan untuk mengukur kandungan air di dalam tanah yang sangat berpengaruh terhadap pertumbuhan tanaman. Kelembapan tanah yang terlalu rendah dapat menyebabkan tanaman mengalami kekurangan air, sedangkan kelembapan yang terlalu tinggi dapat menyebabkan akar tanaman membusuk. Oleh karena itu, pengukuran kelembapan tanah sangat penting dalam sistem irigasi dan manajemen pertanian modern [6].

Teknologi sensor kelembapan tanah banyak digunakan dalam sistem smart irrigation dan monitoring pertanian berbasis IoT. Sensor ini mampu memberikan informasi secara real-time mengenai kondisi air di dalam tanah sehingga sistem irigasi dapat diatur secara otomatis sesuai kebutuhan tanaman. Dengan memanfaatkan data dari sensor kelembapan tanah, penggunaan air dalam pertanian dapat menjadi lebih efisien dan produktivitas tanaman dapat meningkat [7].

### C. Sensor pH Tanah

pH tanah merupakan indikator penting yang menunjukkan tingkat keasaman atau kebasaan tanah. Nilai pH mempengaruhi ketersediaan unsur hara bagi tanaman karena beberapa nutrisi hanya dapat diserap oleh tanaman pada rentang pH tertentu. Tanah yang terlalu asam atau terlalu basa dapat menyebabkan tanaman sulit menyerap nutrisi sehingga pertumbuhan tanaman menjadi tidak optimal [8].

Sensor pH tanah digunakan untuk memantau kondisi keasaman tanah secara otomatis sehingga petani dapat

melakukan tindakan koreksi seperti pemberian kapur atau pupuk tertentu untuk menyesuaikan kondisi tanah. Penelitian menunjukkan bahwa penggunaan sensor pH dalam sistem monitoring tanah dapat membantu menjaga kondisi tanah tetap berada pada rentang optimal bagi pertumbuhan tanaman [3].

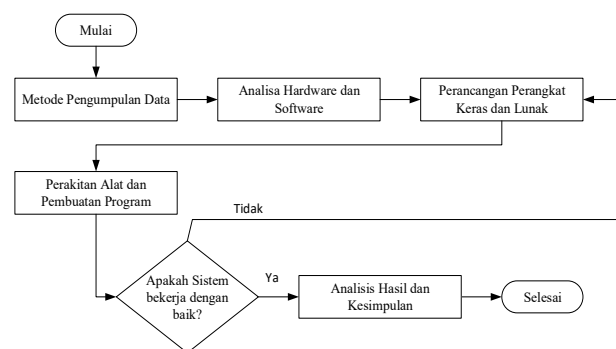
### D. Mikrokontroler

Mikrokontroler merupakan sebuah sistem komputer kecil yang terintegrasi dalam satu chip yang berfungsi sebagai pengendali utama dalam suatu sistem elektronik. Mikrokontroler memiliki komponen utama seperti prosesor, memori, serta port input/output yang dapat digunakan untuk membaca data dari sensor dan mengendalikan perangkat lain dalam sistem [9].

Dalam sistem monitoring pertanian, mikrokontroler digunakan untuk membaca data dari berbagai sensor seperti sensor kelembapan tanah dan sensor pH, kemudian memproses data tersebut untuk ditampilkan atau digunakan dalam pengambilan keputusan. Penggunaan mikrokontroler memungkinkan sistem monitoring lingkungan pertanian dapat bekerja secara otomatis dan efisien sehingga memudahkan pengguna dalam memantau kondisi lahan pertanian [10].

## III. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen dengan merancang dan mengimplementasikan sistem monitoring kelembapan dan pH tanah pada media tanam seledri. Sistem yang dikembangkan menggunakan sensor kelembapan tanah YL-96 untuk mengukur kadar air tanah dan sensor pH tanah untuk mengukur tingkat keasaman tanah. Data dari kedua sensor dibaca oleh mikrokontroler melalui proses konversi analog ke digital (ADC) kemudian diproses untuk menampilkan kondisi tanah.



Gambar 1. Alur Penelitian

Alur dalam penelitian dimulai dari metode pengumpulan data seperti ditunjukkan dalam Gambar 1. Data dikumpulkan berupa tanaman seledri yang ditanam pada media tanah. Tanah tersebut akan diukur tingkat kelembapan dan pH tanahnya agar tanaman seledri tersebut terpantau tingkat kelembapan dan pH tanahnya. Dilanjutkan dengan analisis perangkat keras (hardware) dan perangkat lunak (software). Pada bagian ini menentukan perangkat keras yang digunakan untuk membuat alat yang dapat mengukur kelembapan dan pH tanah pada tanaman seledri, kemudian menambahkan program agar perangkat keras tersebut dapat bekerja.

Dilanjutkan dengan menganalisis hasil pengujian dari data yang didapatkan serta membuat kesimpulan.

Pada alur penelitian, perancangan perangkat keras dan perangkat lunak dapat dilihat pada Gambar 2 dan Gambar 3.

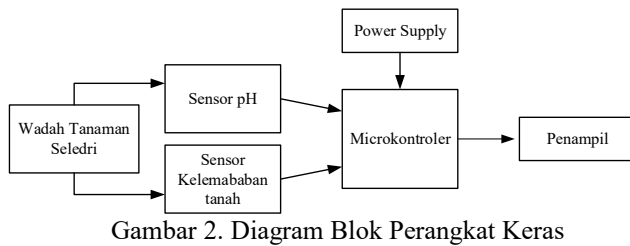
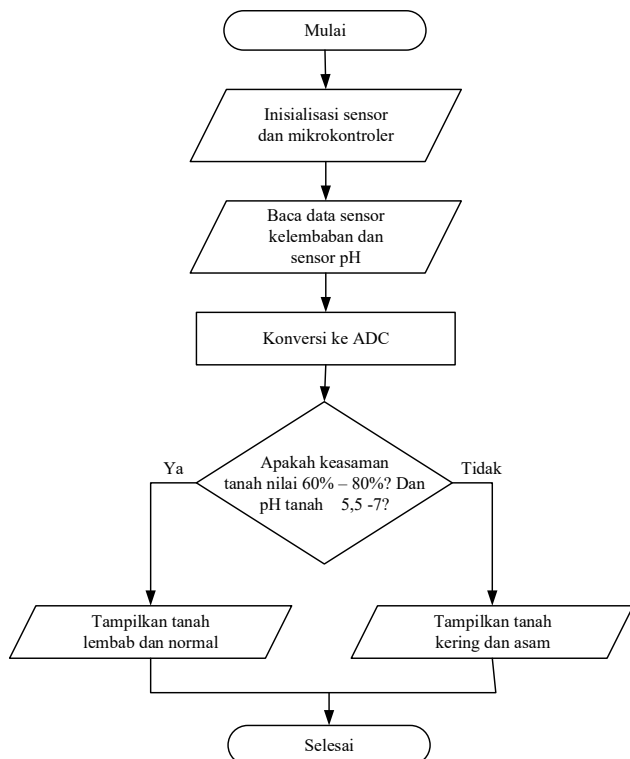


Diagram blok perangkat keras menjelaskan perancangan alat yang akan dibuat. Sensor kelembapan dan sensor pH ditanamkan pada media tanah untuk mendeteksi kadar air dan tingkat keasaman tanah. Kedua sensor tersebut menghasilkan sinyal analog yang kemudian dikirim ke mikrokontroler. Mikrokontroler menerima data dari sensor dan melakukan proses konversi dari analog ke digital (ADC) serta mengolah data untuk menentukan nilai kelembapan dan keasaman tanah yang ditampilkan melalui penampil. Sistem menerima suplai daya dari *power supply* sehingga seluruh komponen dapat bekerja dengan baik.



Gambar 3. menunjukkan rancangan perangkat lunak yang dimulai dari inisialisasi sensor dan mikrokontroler untuk memastikan sistem sudah aktif semua. Selanjutnya melakukan pembacaan data sensor kelembapan dan sensor pH pada media tanah. Data yang diperoleh dari sensor kemudian dikonversi menggunakan *Analog to Digital Converter* (ADC) sehingga dapat diproses oleh mikrokontroler. Mikrokontroler menghitung nilai persentase kelembapan tanah pada rentang 60% - 80% dan

pH tanah pada rentang 5,5 – 7. Jika kedua parameter berada pada rentang tersebut, maka sistem menampilkan tanah berada pada kondisi lembab dan normal. Tetapi jika kelembapan dan pH tanah diluar rentang tersebut maka sistem menampilkan tanah pada kondisi kering dan asam.

#### IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

##### A. Kalibrasi Sensor pH

Kalibrasi sensor pH tanah adalah proses menyesuaikan sensor agar dapat memberikan hasil pengukuran pH tanah yang akurat dengan mengacu pada nilai standar atau referensi. Proses ini penting untuk memastikan bahwa hasil pengukuran yang diperoleh mencerminkan kondisi tanah yang sebenarnya.

Kalibrasi sensor pH membutuhkan larutan cairan basa dan asam yang dilarutkan kedalam air untuk menentukan nilai pH. Kemudian mengukur pH larutan tersebut menggunakan pH meter dan sensor pH dengan tampilan ADC, seperti terlihat dalam Gambar 4.



Gambar 4. Kalibrasi Sensor pH

Kalibrasi sensor pH didasarkan pada dataset yang diperoleh dari pengujian awal sensor terhadap cairan basa dan cairan asam. Dataset menunjukkan hubungan antara nilai ADC (*Analog to Digital Converter*) dan pH terukur pada berbagai kondisi tanah ditunjukkan dalam Tabel I.

Tabel I  
Kalibrasi Sensor pH

| Larutan pH | ADC |
|------------|-----|
| 4.00       | 303 |
| 6.86       | 247 |
| 9.18       | 199 |

Berdasarkan Tabel I, maka hasil analisis regresi linier menghasilkan persamaan kalibrasi :

$$\text{pH} = (-0.0509 \times \text{ADC}) + 19.4177 \quad (1)$$

Untuk menentukan kalibrasi dapat hitung :

1. Gradien (m) dihitung antara dua titik, yaitu pH 4.0 (ADC 303) dan pH 6.85 (ADC 247):

$$m = \frac{6.85 - 4.0}{247 - 303} = \frac{2.85}{-58} \approx -0.0509$$

2. Intercept (c) dihitung dengan memasukkan nilai dari titik 1 (pH 4.0, ADC 303):

$$c=4.0-(-0.0509 \times 303)=4.0+15.4177=19.4177$$

Dengan persamaan kalibrasi ini, nilai pH dapat dihitung dari pembacaan ADC sensor. Misalnya, jika sensor membaca ADC = 300, maka nilai pH yang terukur dapat dihitung sebagai:

$$pH=(-0,0509 \times 300)+19,4177=15.5+19.4177=19.4177$$

Setelah melakukan kalibrasi kedua, dilanjutkan pengujian menggunakan larutan yang sama seperti ditunjukkan dalam Tabel II.

Tabel II  
Hasil kalibrasi sensor pH

| Larutan pH | Pengukuran Sensor pH | Kesalahan Pembacaan |
|------------|----------------------|---------------------|
| 4.00       | 4.00                 | 0                   |
| 6.86       | 6.86                 | 0                   |
| 9.18       | 9.18                 | 0                   |

Sensor pH dalam Tabel II. menunjukkan tingkat akurasi 100% dalam pengukuran pH menggunakan larutan standar. Hal ini menunjukkan bahwa sensor bekerja secara optimal, tanpa error absolut atau error relatif dalam pengukuran pada larutan pH 4, 6,86 dan 9,18. Dengan akurasi ini, sensor dapat digunakan untuk monitoring pH tanah pada tanaman sedri.

#### B. Kalibrasi Sensor Kelembapan Tanah

Kalibrasi sensor YL-96 biasanya digunakan untuk mendeteksi kelembapan tanah bertujuan untuk memastikan pembacaan sensornya akurat sesuai kondisi tanah sebenarnya. Berikut adalah langkah-langkah kalibrasi sederhana untuk sensor YL-96.

Tabel III.  
Hasil Kalibrasi Sensor Kelembapan Tanah

| No | Kondisi Tanah        | Nilai ADC Sensor | Persentase Kelembapan (%) | Kategori |
|----|----------------------|------------------|---------------------------|----------|
| 1  | Tanah sangat kering  | 320              | 25                        | Kering   |
| 2  | Tanah sedikit lembab | 520              | 50                        | Lembab   |
| 3  | Tanah lembab         | 640              | 65                        | Lembab   |
| 4  | Tanah cukup basah    | 750              | 75                        | Lembab   |
| 5  | Tanah sangat basah   | 890              | 90                        | Basah    |

Berdasarkan hasil kalibrasi pada Tabel III, terlihat bahwa nilai ADC sensor meningkat seiring dengan meningkatnya kadar air dalam tanah. Nilai ADC terendah diperoleh pada kondisi tanah kering yaitu sekitar 320, sedangkan nilai ADC tertinggi diperoleh pada kondisi tanah sangat basah yaitu sekitar 890. Nilai tersebut kemudian digunakan sebagai nilai ADC minimum dan ADC maksimum dalam proses konversi nilai kelembapan tanah. Untuk menghitung kelembapan tanah dengan sensor

dapat menggunakan rumus interpolasi linier dengan persamaannya adalah:

$$\begin{aligned} & \text{Kelembapan (\%)} \\ &= \text{BatasBawah} + \\ & \left( \frac{ADC_{Baca} - ADC_{min}}{ADC_{max} - ADC_{min}} \times (\text{Rentang Persentase}) \right) \end{aligned} \quad (2)$$

Untuk membuktikan apakah nilai kelembapan tanah 25% dalam Tabel III untuk nomor1 dengan menggunakan Persamaan 2 adalah sebagai berikut:

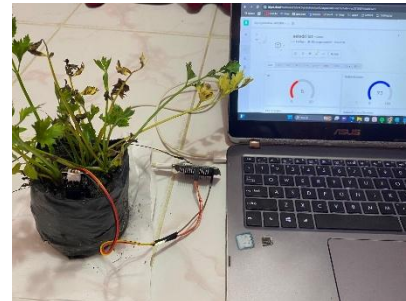
$$\text{Kelembapan} = 25 + \left( \frac{320 - 320}{890 - 320} \times 65 \right)$$

$$\text{Kelembapan} = 25 + \left( \frac{0}{570} \times 65 \right)$$

$$\text{Kelembapan} = 25 + 0 = 25\%$$

#### C. Pengujian Sistem Keseluruhan

Pengujian sistem dilakukan untuk mengetahui kemampuan sensor dalam mendeteksi kondisi tanah berdasarkan parameter kelembapan tanah (%) dan nilai pH tanah. Kondisi tanah dikategorikan lembab dan normal apabila nilai pH berada pada rentang 5,5–7 dan kelembapan tanah berada pada rentang 60%–80%. Yang ditunjukkan pada Gambar 5. Pada Tabel IV menunjukkan hasil pengujian keseluruhan sistem.



Gambar 5. Pengujian Sistem Keseluruhan

Tabel IV  
Hasil Pengujian Sistem Keseluruhan

| No. | Nilai ADC | Kelembapan (%) | pH Tanah | Kondisi Tanah | Ket   |
|-----|-----------|----------------|----------|---------------|-------|
| 1   | 350       | 30             | 6,2      | Kering-Normal | Benar |
| 2   | 450       | 40             | 5,8      | Kering-Normal | Benar |
| 3   | 550       | 55             | 4,5      | Kering-Asam   | Benar |
| 4   | 650       | 66             | 6,5      | Lembab-Normal | Benar |
| 5   | 660       | 68             | 5,2      | Lembab-Asam   | Benar |
| 6   | 680       | 70             | 6,8      | Lembab-Normal | Benar |
| 7   | 720       | 74             | 6,0      | Lembab-Normal | Salah |
| 8   | 780       | 80             | 6,4      | Lembab-Normal | Benar |
| 9   | 850       | 88             | 7,5      | Basah-Basa    | Benar |
| 10  | 890       | 92             | 6,7      | Basah-Basa    | Salah |

Untuk mengitung nilai akurasi pada pengujian sistem keseluruhan dapat menggunakan Persamaan 3, yaitu:

$$Akurasi = \frac{\sum Data Benar}{\sum Total Data} \times 100\% \quad (3)$$

Sehingga:

$$Akurasi = \frac{9}{10} \times 100\%$$

$$Akurasi = 90\%$$

Berdasarkan hasil pengujian yang dilakukan terhadap 10 titik sampel pada media tanam seledri, sistem menunjukkan performa yang sangat stabil. Akurasi keseluruhan sistem mencapai 90%. Tingkat kesalahan (error) sebesar 10% (1 data tidak valid) terjadi pada sampel nomor 10 yang disebabkan oleh kesalahan pada klasifikasi kondisi pH tanah dianggap wajar karena adanya faktor resistansi kontak pada sensor kelembapan dan fluktuasi tegangan pada sensor pH analog. Dengan tingkat akurasi tersebut, sistem dinyatakan layak untuk mengontrol kondisi tanaman seledri secara otomatis.

## V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perancangan, implementasi, dan pengujian sistem pemantauan tanah pada tanaman seledri yang telah dilakukan, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Sistem berhasil mengonversi nilai ADC dari sensor kelembapan menjadi nilai persentase dan membaca tingkat keasaman tanah (pH) secara *real-time*. Logika sistem mampu mengklasifikasikan kondisi tanah menjadi "Lembab dan Normal" saat parameter berada pada rentang 60%–80% untuk kelembapan dan 5,5–7 untuk pH.
2. Dari hasil pengujian terhadap 10 sampel data, sistem menunjukkan kinerja yang sangat baik dengan tingkat akurasi sebesar 90% (9 data valid) dan tingkat error sebesar 10% (1 data tidak valid). Hal ini menunjukkan bahwa sistem layak untuk digunakan dalam memantau kondisi tanah untuk tanaman seledri.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan apresiasi dan terima kasih kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (LPPM) Universitas Borneo Tarakan (UBT) yang telah memberikan dukungan pendanaan melalui Skema Pendanaan Penelitian Universitas Borneo Tarakan. Dukungan tersebut sangat membantu dalam pelaksanaan kegiatan penelitian ini mulai dari tahap perencanaan, pengumpulan data, hingga penyusunan laporan penelitian. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah memberikan kontribusi dan dukungan selama proses penelitian sehingga penelitian ini dapat terlaksana dengan baik.

## REFERENSI

- [1] D. Loconsole et al., "Soil Moisture Sensing Technologies: Principles and Applications in Precision Agriculture," *Agronomy*, vol. 15, no. 12, 2025. <https://www.mdpi.com/2073-4395/15/12/2788>
- [2] S. Arifin et al., "Sistem Monitoring Kesuburan Lahan Pertanian menggunakan Sensor pH dan Kelembapan Tanah Berbasis IoT," *Jurnal Rekayasa Informatika*, 2025. <https://journal.ubb.ac.id/index.php/jrifi/article/view/5334>
- [3] R. Eso et al., "Soil Moisture and pH Monitoring System Using IoT Technology," *Circuit Journal*, 2023. <https://jurnal.ar-raniry.ac.id/index.php/circuit/article/view/17493>
- [4] M. Yaqin et al., "IoT-Based Soil pH and Moisture Monitoring System," *Brilliance Journal*, 2025. <https://jurnal.itscience.org/index.php/brilliance/article/view/5974>
- [5] J. Kumari et al., "IoT-Enabled Soil Monitoring System for Precision Agriculture," *Sensors*, 2023. <https://www.mdpi.com/1424-8220/23/4/2129>
- [6] X. Zhang et al., "Advanced Technologies of Soil Moisture Monitoring in Agriculture," *Smart Agricultural Technology*, 2024. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666154324005106>
- [7] N. Aisyah et al., "Design of Smart Irrigation System Using Soil Moisture Sensor," *Journal of Physics: Conference Series*, 2022. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2117/1/012017>
- [8] M. A. Eldeeb et al., "Electrochemical Soil pH Sensor for Real-Time Soil Monitoring," *Micromachines*, 2023. <https://www.mdpi.com/2072-666X/14/12/2188>
- [9] M. Banzi and M. Shiloh, *Getting Started with Arduino*, 3rd ed., Maker Media, 2022. <https://www.arduino.cc/en/Guide>
- [10] P. Mellor, "Microcontroller Based Embedded Systems Design," *IEEE Access*, 2021. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9447192>