

Sistem Monitoring Kelembapan Tanah, Kelembapan Udara, Suhu Udara dan Intensitas Cahaya Pada Terarium Tertutup

Khairi*¹, Reni Agustiani², Wilson Jefriyanto³

^{1,2,3}Program Studi Fisika, Universitas Palangka Raya, Indonesia

e-mail: wilsonjefriyanto@gmail.com

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan membangun sistem monitoring berbasis Internet of Things (IoT) pada terarium tertutup untuk mengamati empat parameter lingkungan utama, yaitu kelembapan tanah, kelembapan udara, suhu udara, dan intensitas cahaya. Berbeda dari sistem pemantauan konvensional yang umumnya bersifat pasif, kebaruan (novelty) penelitian ini terletak pada penerapan mekanisme kendali tertutup (closed-loop control) otonom yang secara simultan mengintegrasikan akuisisi data dan respons aktuator (ultrasonic fogger dan lampu LED) untuk menjaga kestabilan iklim mikro. Sistem ini menggunakan mikrokontroler NodeMCU ESP8266 sebagai pusat pengendali yang menerima data dari sensor Soil Moisture MD0869, DHT11, dan BH1750, kemudian mengirimkannya secara real-time ke platform ThingSpeak untuk visualisasi data. Selain fungsi pemantauan, sistem juga dilengkapi aktuator ultrasonic fogger dan lampu LED yang berfungsi untuk menstabilkan kelembapan dan suhu secara otomatis ketika nilai pembacaan sensor melewati ambang batas tertentu. Setiap sensor dikalibrasi menggunakan metode regresi linear untuk meningkatkan akurasi hasil pengukuran terhadap alat referensi pembandingan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem monitoring bekerja dengan tingkat akurasi tinggi setelah kalibrasi, dengan nilai Mean Absolute Error (MAE) untuk kelembapan tanah sebesar 3,07%, suhu udara 0,37°C, kelembapan udara 1,35%, dan intensitas cahaya 2,62 Lux. Pengujian presisi menunjukkan rasio simpangan masing-masing sebesar 6,26% untuk kelembapan tanah, 1,80% untuk suhu udara, 2,13% untuk kelembapan udara, dan 0,59% untuk intensitas cahaya. Secara keseluruhan, penelitian ini berhasil menciptakan sistem pengendalian iklim mikro yang adaptif, efisien, serta berkelanjutan sebagai model penerapan teknologi IoT dalam bidang fisika lingkungan dan instrumentasi.

Kata kunci— Intensitas Cahaya, Kelembapan Tanah, Kelembapan Udara, Suhu Udara, Terarium Tertutup.

1. PENDAHULUAN

Terarium merupakan miniatur ekosistem buatan yang ditanam dalam wadah transparan seperti kaca atau plastik, dan umumnya digunakan untuk menumbuhkan tanaman hias di dalam ruangan. Salah satu bentuk yang banyak dikembangkan adalah terarium tertutup, yang memungkinkan terjadinya proses biologis seperti siklus air, pertukaran gas, serta interaksi antara komponen biotik dan abiotik secara berkelanjutan (Manurung *et al.* 2023). Dalam sistem tertutup seperti terarium, perubahan kecil pada suhu atau kelembapan dapat berdampak besar terhadap keseimbangan ekosistem karena ruangnya yang terbatas (Ulinuha & Farid, 2023). Oleh karena itu, diperlukan suatu sistem yang mampu menjaga kestabilan kondisi lingkungan secara otomatis.

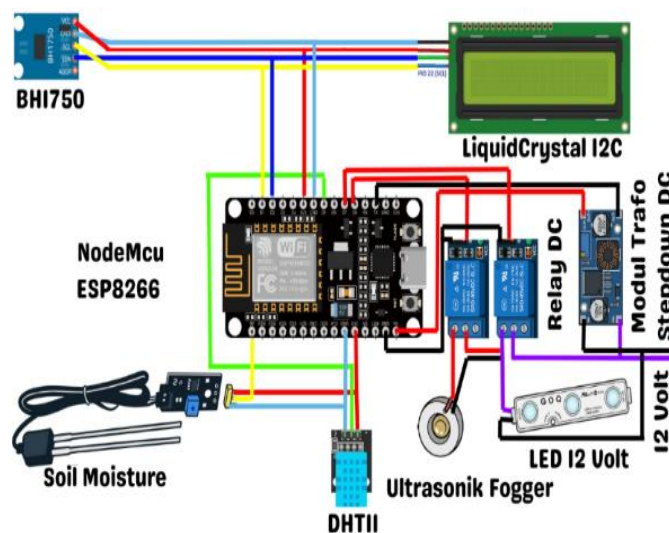
Sebagian besar penelitian sebelumnya masih berfokus pada sistem pemantauan sederhana tanpa integrasi pengendalian otomatis terhadap seluruh parameter lingkungan (Liu *et al.*, 2019; Nurwarsito & Adaby, 2024). Untuk menjawab keterbatasan tersebut, penelitian ini mengembangkan sistem yang tidak sekadar melakukan pemantauan pasif, melainkan menerapkan mekanisme kendali tertutup (closed-loop control) yang secara otonom mengintegrasikan akuisisi data lingkungan dengan respons aktuator. Sistem ini dibangun pada terarium tertutup berbasis Internet of Things (IoT) dengan mengintegrasikan sensor DHT11, Soil Moisture MD0869, dan BH1750, serta aktuator ultrasonic fogger dan lampu LED yang dikendalikan secara presisi oleh mikrokontroler NodeMCU ESP8266.

2. METODE PENELITIAN

Pemilihan perangkat sensor pada penelitian ini didasarkan pada pertimbangan teknis yang matang agar sesuai dengan karakteristik mikroklimat di dalam terarium tertutup. Sensor suhu dan kelembapan udara DHT11 dipilih karena memiliki konsumsi daya yang sangat rendah, serta mampu menyediakan sinyal keluaran digital terkalibrasi secara langsung melalui bus 1-wire (Aosong Electronics Co., Ltd. n.d). Meskipun di pasaran terdapat alternatif seperti sensor DHT22 yang menawarkan kelebihan berupa tingkat akurasi yang lebih tinggi, rentang pengukuran suhu dan kelembapan yang lebih luas (-40°C sampai 80°C dan kelembapan 0–100% RH) (Aosong Electronics Co., Ltd n.d), serta resolusi pembacaan hingga tingkat desimal, penerapan pada terarium tertutup ini hanya membutuhkan rentang pengukuran suhu di atas nilai minus derajat, di mana sensor DHT22 juga memiliki kekurangan berupa dimensi fisik yang lebih besar. Sebaliknya, meskipun DHT11 memiliki kekurangan berupa akurasi yang lebih rendah dan hanya membaca bilangan bulat tanpa desimal, sensor ini dinilai sudah sangat stabil, ekonomis, untuk memantau fluktuasi mikroklimat harian di dalam wadah terarium tertutup tanpa memerlukan kompleksitas pemrosesan yang berlebih. Sementara itu, sensor kelembapan tanah Soil Moisture MD0869 dipilih karena dilengkapi probe elektroda berlapis nickel plating yang tahan terhadap oksidasi dan korosi akibat paparan kelembapan tinggi dalam jangka panjang, menjadikannya jauh lebih andal dibandingkan modul konvensional seperti FC-28 yang rentan mengalami pelapukan elektrolitik. Adapun sensor intensitas cahaya BH1750 dipilih karena menggunakan komunikasi digital I2C dengan konverter ADC 16-bit internal (ROHM Co., Ltd. 2009), sehingga mampu memberikan pembacaan iluminansi dalam satuan Lux secara presisi dan linier serta kebal terhadap derau elektrik dibandingkan sensor berbasis LDR yang memerlukan rangkaian tambahan yang rumit.

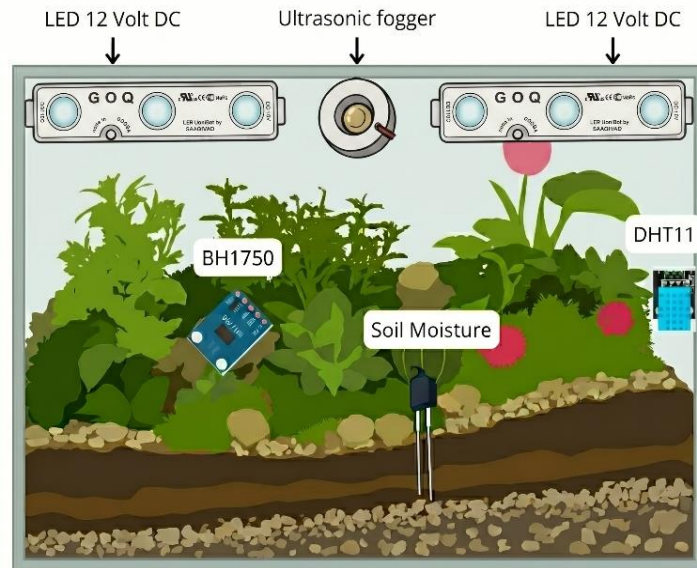
2.1 Perancangan Sistem

Perancangan perangkat keras berpusat pada mikrokontroler NodeMCU ESP8266 sebagai unit pemroses utama dan antarmuka komunikasi Wi-Fi (Nurwarsito dan Adaby 2024; Satriadi 2019). Sistem diimplementasikan pada wadah terarium kaca berdimensi 12cm x 25cm x 15cm. Sensor intensitas cahaya BH1750 dan modul LCD dihubungkan secara paralel melalui antarmuka I2C. Sensor kelembapan tanah MD0869 dihubungkan ke pin analog (A0) untuk membaca nilai ADC (Zahro dkk. 2025), (2025), sedangkan sensor DHT11 serta aktuator (*ultrasonic fogger* dan lampu LED melalui modul relai DC) dihubungkan ke pin digital GPIO. Skema rangkaian keseluruhan sistem dapat dilihat pada Gambar 1.



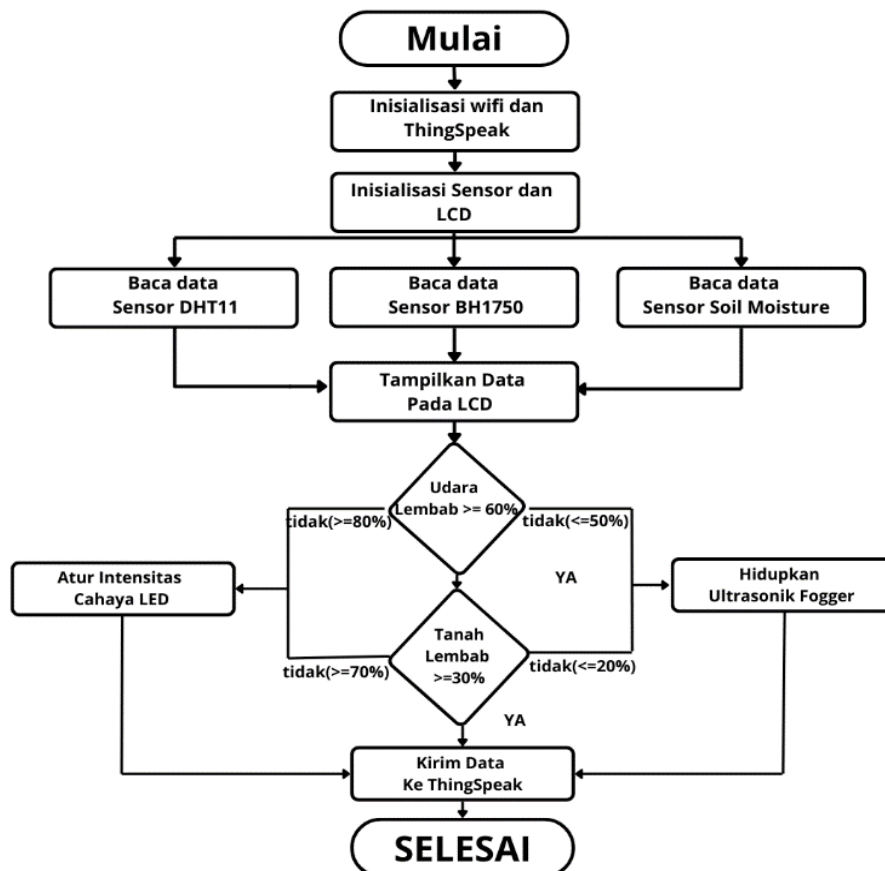
Gambar 1. Skema rangkaian perangkat keras sistem monitoring dan kendali

Untuk memastikan akurasi data dan efektivitas pengendalian mikroklimat, penempatan sensor dan aktuator diatur secara strategis di dalam wadah terarium sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 2.



Gambar 2. Tata letak integrasi sensor dan aktuatur pada terarium tertutup

Perancangan perangkat lunak dilakukan menggunakan Arduino IDE dengan menerapkan logika kendali otomatis (*closed-loop control*). Diagram kerja sistem secara rinci ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Diagram kerja sistem kendali otomatis mikroklimat

2.2 Karakterisasi dan Kalibrasi

Kalibrasi dan karakterisasi dilakukan untuk memvalidasi serta menyelaraskan hasil pembacaan sensor terhadap alat ukur referensi yang telah terstandarisasi. Prosedur ini dibagi berdasarkan karakteristik masing-masing sensor:

1. Karakterisasi dan Kalibrasi Sensor Kelembapan Tanah (MD0869)

Pengujian dilakukan menggunakan sampel tanah seberat 200 gram dengan variasi penambahan volume air secara bertahap dari kondisi kering mutlak hingga jenuh air. Nilai tegangan keluaran (V_{out}) dikonversi menjadi nilai digital melalui *Analog to Digital Converter* (ADC) 10-bit pada mikrokontroler. Pembacaan sensor dibandingkan langsung dengan alat ukur referensi (*Soil Moisture tester*) untuk mendapatkan persamaan regresi linear antara nilai ADC dan persentase kelembapan tanah.

2. Kalibrasi Sensor Suhu dan Kelembapan Udara (DHT11)

Sensor DHT11 dan alat ukur referensi (*Thermo-Hygrometer* TASI-TA620A) diletakkan berdampingan di dalam wadah tertutup. Kondisi iklim mikro dimanipulasi secara bertahap untuk menghasilkan rentang perubahan suhu dan kelembapan udara yang luas. Pengambilan sampel data dilakukan secara berkala, kemudian dianalisis menggunakan metode regresi linear untuk mereduksi *offset* kesalahan pembacaan awal.

3. Kalibrasi Sensor Intensitas Cahaya (BH1750)

Sensor BH1750 dan *Digital Lux Meter* (AS823) ditempatkan dalam wadah terkontrol yang menghadap ke sumber cahaya yang sama. Pengujian dilakukan pada berbagai tingkat iluminansi (dari kondisi redup hingga terang) data nilai lux mentah dari sensor dicatat dan dibandingkan terhadap alat referensi untuk memperoleh persamaan koreksi linear.

Hubungan matematis antara data sensor dan alat ukur acuan pada seluruh pengujian dianalisis menggunakan persamaan regresi linear:

$$y = ax + b \quad (1)$$

di mana y adalah nilai dari alat referensi, x adalah nilai pembacaan sensor, a adalah koefisien kemiringan (*sensitivity*), dan b adalah konstanta *offset*. Tingkat akurasi akhir instrumen dievaluasi menggunakan parameter statistik *Mean Absolute Error* (MAE) dan *Root Mean Square Error* (RMSE). Maka implementasi dari persamaan regresi linear untuk masing-masing sensor sebagai berikut:

$$H_{referensi} = a \cdot H_{sensor} + b \quad (2)$$

2.3 Analisis Data

Setelah persamaan regresi linear diperoleh, dilakukan pengujian nilai koreksi untuk mengetahui tingkat kesesuaian hasil pembacaan sensor terhadap nilai referensi. Nilai koreksi diperoleh dengan mensubstitusikan data hasil pembacaan sensor ke dalam persamaan kalibrasi $y=ax+b$, sehingga nilai pembacaan sensor dapat dikonversi mendekati nilai referensi.

Selisih antara nilai hasil koreksi dan nilai referensi digunakan untuk menghitung persentase kesalahan relatif (%Error), yang bertujuan untuk menunjukkan besarnya deviasi pengukuran sensor terhadap nilai acuan. Persamaan kesalahan relatif adalah sebagai berikut:

$$Error(\%) = \frac{|y_{standar} - y_{sensor}|}{y_{standar}} \times 100\% \quad (3)$$

Parameter kesalahan seperti Mean Absolute Error (MAE), Mean Squared Error (MSE), Root Mean Squared Error (RMSE) serta analisis berbasis selisih sensor referensi merupakan pendekatan umum dalam evaluasi sensor berbiaya rendah (Lee et al., 2020).

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_{standar,i} - y_{sensor,i}| \quad (4)$$

RMSE merupakan parameter yang lebih sensitif terhadap kesalahan besar karena menggunakan kuadrat selisih. RMSE memberikan gambaran akurasi keseluruhan sensor, terutama ketika terdapat outlier atau kesalahan ekstrem.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_{standar,i} - y_{sensor,i})^2} \quad (5)$$

Rumus standar deviasi pada penelitian ini mengacu pada (Walpole et al., 2012):

$$SD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (6)$$

Dengan:

x_i = hasil pembacaan sensor ke- i

$\bar{x}$ = nilai rata-rata pembacaan sensor

n = jumlah data

nilai standar deviasi yang kecil menunjukkan bahwa pembacaan sensor konsisten dan tidak memiliki variasi yang besar.

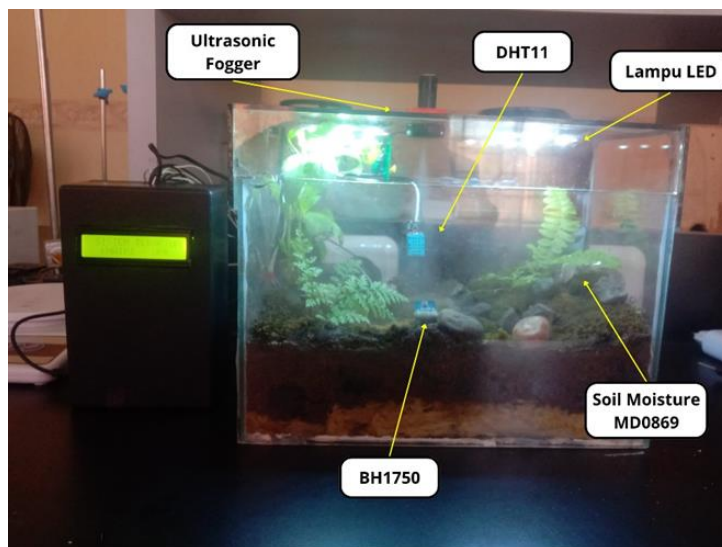
2.4 Visualisasi Data

Data yang diperoleh dari beberapa sensor akan divisualisasikan secara *real-time* menggunakan *Website ThingSpeak* untuk visualisasi data kelembapan tanah, kelembapan udara, suhu udara dan intensitas cahaya, Visualisasi bertujuan untuk memudahkan pengguna memantau kondisi terarium. *Interface* pada website ThingSpeak interaktif dalam menampilkan grafik secara langsung.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Integrasi Sistem Pada Terarium

Keakuratan akuisisi data dan efektivitas pengendalian mikroklimat sangat bergantung pada tata letak komponen di dalam wadah terarium. Implementasi tata letak instrumen pada ekosistem terarium.

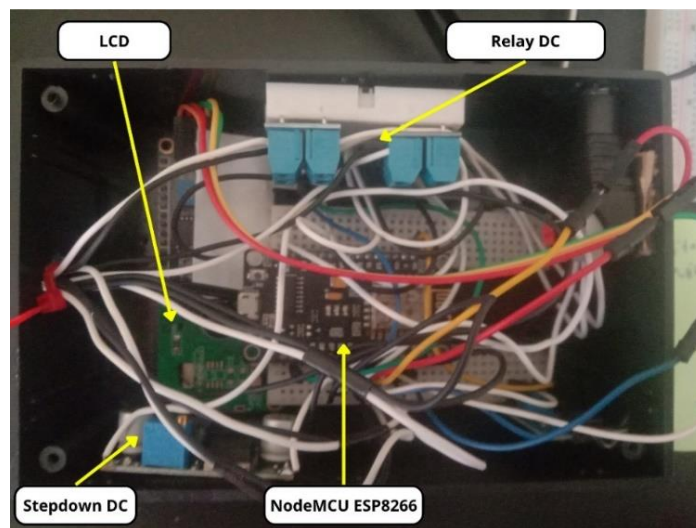


Gambar 4. Integrasi Sistem pada Terarium

Perangkat NodeMCU ESP8266 beserta modul relai ditempatkan di luar kompartemen utama untuk mencegah terjadinya hubung singkat akibat paparan kelembapan tinggi. Sementara itu, komponen *probe* sensor tersebar di dalam wadah. Sensor suhu dan kelembapan udara (DHT11) ditempatkan melekat pada dinding bagian dalam terarium, sejajar dengan area tajuk (daun) tanaman untuk merepresentasikan kondisi udara yang memengaruhi proses transpirasi. Sensor kelembapan tanah (MD0869) ditanamkan untuk mendeteksi ketersediaan air tanah yang sebenarnya. Sensor intensitas cahaya (BH1750) diletakkan menghadap ke atas di area permukaan tanah agar tingkat paparan foton yang menyinari tanaman dapat terukur tanpa

terhalang bayangan *casing*. Aktuator *ultrasonic fogger* pasang pada dinding atas untuk memastikan sebaran kabut uap air jatuh merata ke seluruh permukaan terarium. Sedangkan lampu LED 12V DC ditempatkan di bagian atap wadah yang menghadap langsung ke bawah sebagai sumber penyorotan buatan dan pemanas termal.

Mikrokontroler NodeMCU ESP8266 juga difungsikan sebagai otak pemroses algoritma *closed-loop control* (kendali tertutup). Pada gambar 5 hasil rangkaian yang telah di buat agar sistem membaca parameter fisis secara *real-time* dan membandingkannya dengan nilai ambang batas (*set-point*) yang telah ditanamkan pada program. Jika sensor DHT11 mendeteksi kelembapan udara turun ($\leq 50\%$) atau sensor MD0869 mendeteksi tanah mendekati kondisi kering ($\leq 40\%$), NodeMCU akan mengirimkan sinyal *HIGH* ke pin relai untuk memicu aktivasi *Ultrasonic Fogger*. Sebaliknya, jika sistem mendeteksi tingkat kelembapan tanah mencapai kejenuhan (kondisi basah $\geq 70\%$), relai akan menyalakan aktuator lampu LED untuk membantu proses evaporasi uap air. Melalui mekanisme sinkronisasi antara perangkat *input* (sensor) dan *output* (aktuator) ini, stabilitas termodinamika terarium dapat dipertahankan secara otonom.



Gambar 5. Sistem monitoring

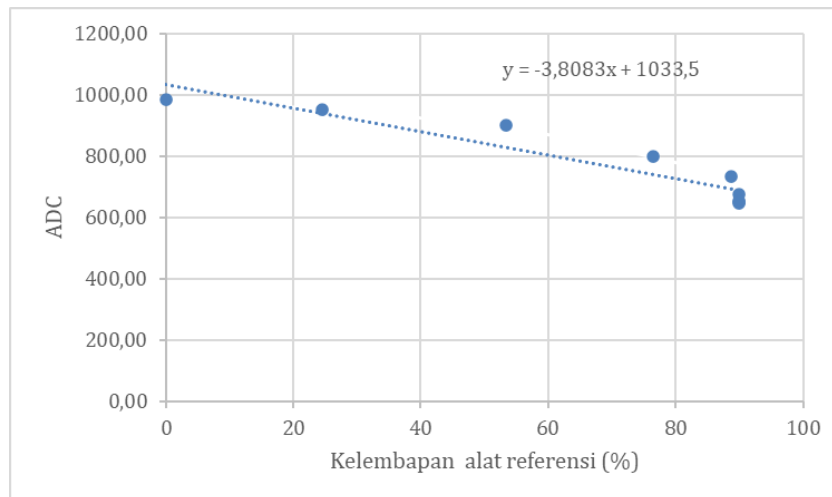
3.2 Data Karakterisasi

Karakterisasi ini bertujuan untuk mengetahui respons statis sensor terhadap perubahan volume air dalam medium tanah, serta untuk menentukan rentang dinamis (*dynamic range*) dari sinyal keluaran sensor. Pengujian dilakukan menggunakan sembilan sampel tanah seberat 200 gram dengan variasi volume air mulai dari 0 ml hingga 80 ml. Keluaran sensor diukur menggunakan multimeter untuk mendapatkan nilai tegangan (Volt) dan dibaca oleh *Analog to Digital Converter* (ADC) pada mikrokontroler ESP8266. Hasil rata-rata dari lima kali pengulangan pengujian disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1 Data karakterisasi MD0869

Volume air (ml) pada 200gr tanah	Kelembapan alat referensi (%)	Nilai pembacaan ADC	Tegangan multimeter (Volt)
0	0	985.52	3.18
10	16	953.87	3.07
20	37	900.50	2.90
30	77	799.34	2.58
40	94	734.80	2.37
50	100	677.70	2.18
60	100	651.64	2.10
70	100	647.29	2.09
80	100	653.50	2.11

Berdasarkan tabel 1, terlihat bahwa sensor MD0869 bekerja berdasarkan prinsip resistif. Penambahan volume air mengakibatkan peningkatan konduktivitas (penurunan resistansi) medium tanah, yang ditandai dengan menurunnya tegangan *output* dan nilai ADC secara proporsional. Untuk melihat tren perubahan secara lebih jelas, data tersebut diplot menjadi grafik hubungan antara volume air dan nilai ADC seperti yang ditunjukkan pada gambar 6.



Gambar 6. Grafik Karakterisasi Sensor MD0869

Berdasarkan Gambar 6, respons sensor menunjukkan penurunan yang linear pada rentang penambahan air 0 ml hingga 50 ml. Namun, kurva mulai melandai dan mencapai batas ukur maksimumnya (perubahan sangat kecil) pada penambahan air melebihi 60 ml. Dari grafik dan tabel tersebut, dapat diidentifikasi dua batas operasi mutlak dari sensor pada medium uji. Batas Atas (Kering Maksimal): Pada kondisi tanah kering tanpa penambahan air (0 ml), sistem membaca rata-rata tegangan tertinggi sebesar 3,12 V dengan nilai ADC rata-rata 969. Ketika sensor diangkat ke udara terbuka (tanpa medium), ADC membaca nilai maksimal yaitu 1024 yang dipengaruhi oleh batas toleransi internal ESP8266. Oleh karena itu, nilai ADC 1024 ditetapkan sebagai batas kering sistem. Batas Bawah (Basah Jenuh): Pada penambahan air 60 ml, 70 ml, hingga 80 ml, nilai ADC tertahan secara konstan di kisaran 646 - 649 (tegangan 2,08 V). Secara fisis, hal ini membuktikan bahwa tanah sampel seberat 200 gram telah mencapai titik jenuh air, sehingga medium tidak lagi mampu mengikat air tambahan dan nilai hambatannya menjadi konstan. Nilai ADC 646 ditetapkan sebagai batas basah mutlak sistem.

3.3 Data Kalibrasi

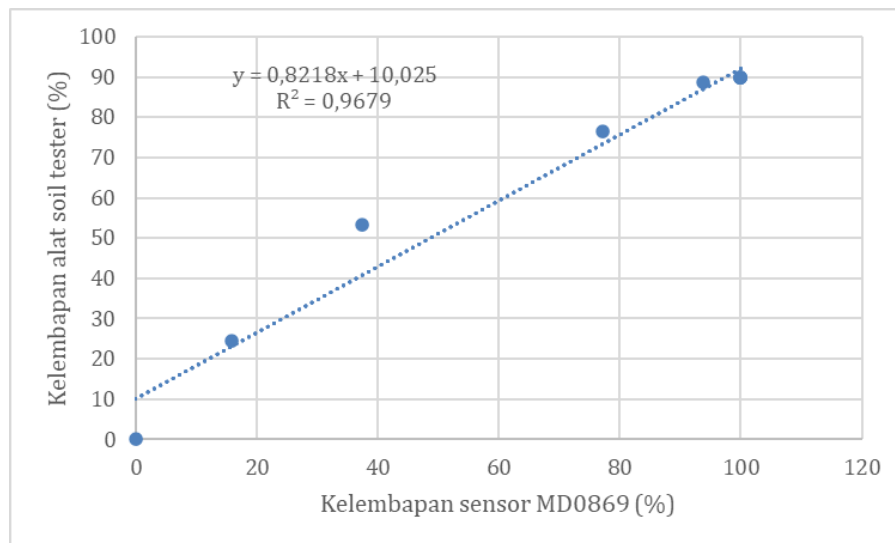
Sebelum diintegrasikan ke dalam sistem pemantauan terarium, setiap sensor melalui tahap pengujian kalibrasi dengan membandingkannya terhadap alat ukur referensi standar. Hubungan matematis antara pembacaan sensor dan nilai referensi dianalisis menggunakan metode regresi linear ($y = ax + b$).

3.3.1 Sensor MD0869

Pengujian kalibrasi dilakukan dengan membandingkan nilai keluaran ADC terhadap *Soil Moisture tester* sebagai alat referensi. Berdasarkan hasil pengujian pada berbagai variasi kadar air tanah, diperoleh persamaan regresi linear penyesuaian $y = 0,8218x + 10,025$ dengan koefisien determinasi sebesar $R^2 = 0,9679$. Berdasarkan evaluasi unjuk kerja pasca-kalibrasi, tingkat kesalahan pengukuran berhasil ditekan dengan nilai *Mean Absolute Error* (MAE) sebesar 3,07% dan *Root Mean Square Error* (RMSE) sebesar 4,62%.

Tabel 2. Data kalibrasi sensor MD0869

Perlakuan	Kelembapan MD0869 (%)	Kelembapan alat soil tester (%)
200gr tanah + 0 ml air	0	0
200gr tanah + 10 ml air	16	25
200gr tanah + 20 ml air	37	53
200gr tanah + 30 ml air	77	76
200gr tanah + 40 ml air	94	89
200gr tanah + 50 ml air	100	90
200gr tanah + 60 ml air	100	90
200gr tanah + 70 ml air	100	90
200gr tanah + 80 ml air	100	90



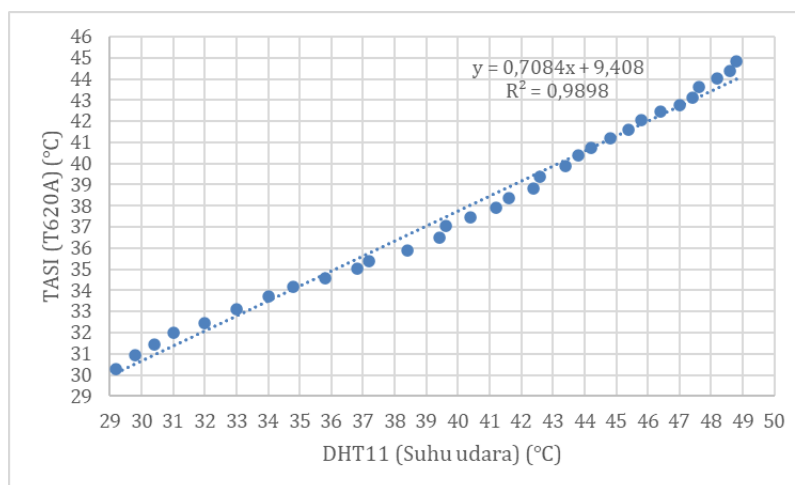
Gambar 7. Grafik Kalibrasi Sensor MD0869

3.3.2 Sensor DHT11

Kalibrasi sensor DHT11 dilakukan di dalam ruang uji tertutup dengan membandingkan pembacaannya terhadap *Thermo-Hygrometer* komersial (TASI-TA620A). Untuk parameter suhu udara, pengujian menghasilkan persamaan regresi linear $y = 0,7084x + 9,4080$ dengan $R^2 = 0,9898$, serta nilai MAE mencapai $0,37^\circ\text{C}$ dan RMSE sebesar $0,44^\circ\text{C}$. Sementara itu, untuk parameter kelembapan udara, diperoleh persamaan regresi linear $y = 0,8927x + 14,4395$ dengan $R^2 = 0,9728$, serta nilai MAE sebesar 1,35% dan RMSE 1,74%.

Tabel 3. Data Kalibrasi Sensor DHT11

Waktu (Menit)	TASI (T620A) (°C)	DHT11(°C)
0.5	30.28	29.2
1	30.92	29.8
1.5	31.44	30.4
2	32.02	31
2.5	32.48	32
3	33.12	33
3.5	33.72	34
4	34.18	34.8
4.5	34.56	35.8
5	35.02	36.8
5.5	35.38	37.2
6	35.88	38.4
6.5	36.52	39.4
7	37.04	39.6
7.5	37.48	40.4
8	37.92	41.2
8.5	38.38	41.6
9	38.8	42.4
9.5	39.36	42.6
10	39.86	43.4
10.5	40.4	43.8
11	40.76	44.2
11.5	41.22	44.8
12	41.58	45.4
12.5	42.06	45.8
13	42.46	46.4
13.5	42.76	47
14	43.14	47.4
14.5	43.64	47.6
15	44.02	48.2
15.5	44.36	48.6
16	44.82	48.8



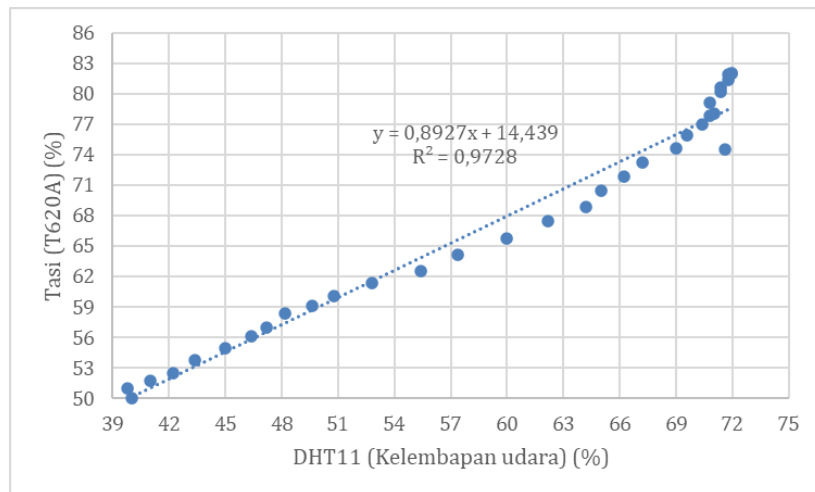
Gambar 8. Grafik Kalibrasi Sensor DHT11

3.3.3 Sensor Intensitas Cahaya (BH1750)

Pengujian sensor intensitas cahaya BH1750 dilakukan dengan membandingkannya terhadap *Digital Lux Meter* (AS823) pada berbagai tingkat iluminansi. Hasil analisis regresi linear menunjukkan persamaan koreksi $y = 1,3255x - 2,9545$ dengan nilai koefisien determinasi yang sangat tinggi, yaitu $R^2 = 0,9999$. Tingkat akurasi akhir instrumen mencatatkan nilai MAE sebesar 2,62 Lux dan RMSE sebesar 3,18 Lux, yang menunjukkan bahwa sensor memiliki tingkat kelinieran dan kepresisian yang sangat baik.

Tabel 4. Data Kalibrasi Sensor

No	Lux Meter AS823(Lux)	BH1750 (Lux)
1	1	0
2	5.8	3
3	100.4	76
4	217.8	166.6
5	313	239.2
6	425.6	327.2
7	542.4	414.4
8	636.2	485.2
9	1848	1396.6
10	2334.6	1761



Gambar 9. Grafik Kalibrasi Sensor BH1750

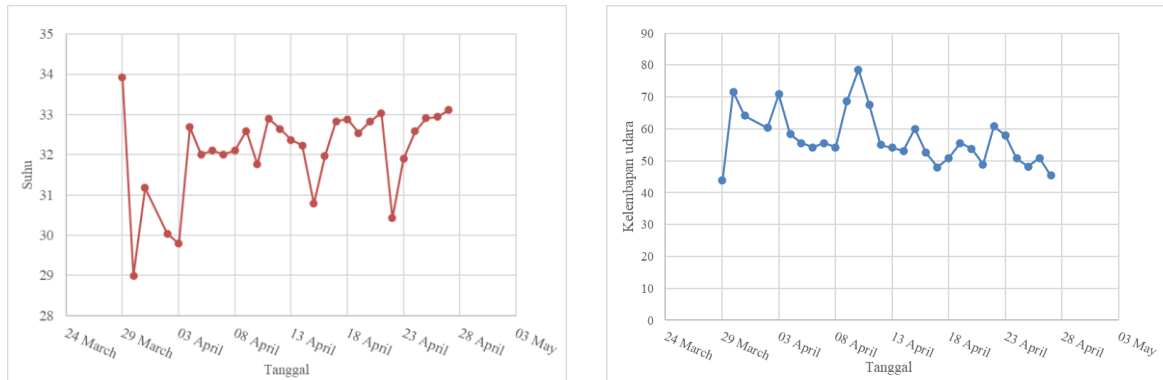
3.4 Pengujian Seluruh Sistem dan Hasil Monitoring

Pengujian keseluruhan sistem dilakukan untuk mengevaluasi performa instrumen dan algoritma kendali dalam kondisi operasional nyata di ekosistem terarium tertutup. Pengambilan data monitoring dilaksanakan secara kontinu selama satu bulan pengujian guna mengamati fluktuasi iklim mikro secara komprehensif. Selama masa pengujian, mikrokontroler NodeMCU ESP8266 berhasil mengakuisisi dan mengirimkan data parameter lingkungan secara *real-time* ke platform IoT ThingSpeak.

3.4.1 Analisis Pemantauan Suhu dan Kelembapan Udara

Suhu udara rata-rata harian di dalam terarium menunjukkan kestabilan pada kisaran 32°C hingga 33°C, walaupun pada tanggal 29 maret suhu di luar terarium mencapai 34°C tetapi pada terarium suhu tercatat 29°C, hal ini wajar terjadi dikarenakan sistem melakukan penyesuaian pada kondisi terarium tertutup, di mana wadah kaca mampu meredam fluktuasi suhu luar yang ekstrem. Kestabilan transmisi data ini membuktikan keandalan sensor DHT11 yang telah dikalibrasi dalam menjalankan fungsi pemantauan suhu jangka panjang secara stabil melalui platform IoT (Tiyas *et al.*, 2025). Sementara itu, kelembapan udara bergerak dinamis dan saling bertolak belakang dengan fluktuasi suhu. Fenomena ini selaras dengan prinsip fisika lingkungan, di mana

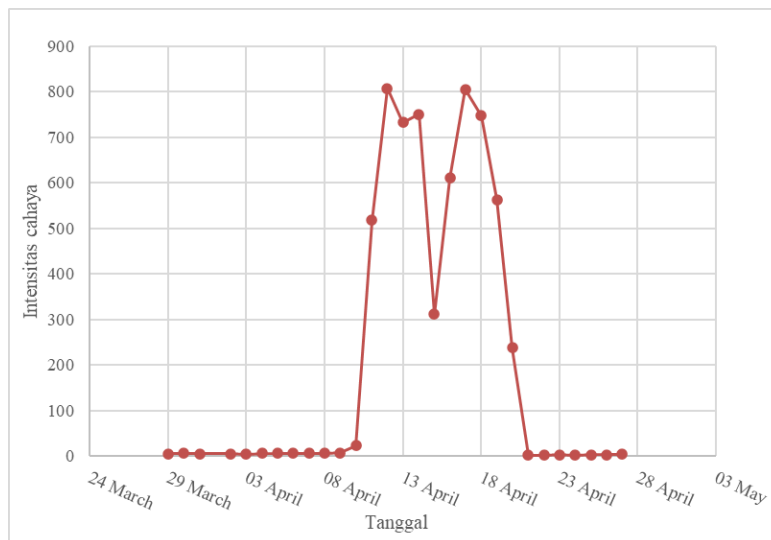
dinamika uap air di dalam ruang yang tertutup sangat dikendalikan oleh perubahan suhu di sekitarnya (Morris 2001). Ketika kelembapan udara turun menyentuh batas kritis (50%), sistem mikrokontroler terbukti tanggap dengan secara otomatis mengaktifkan aktuator ultrasonic fogger untuk mengembalikan stabilitas iklim mikro.



Gambar 10. Grafik Analisis Suhu dan Kelembapan Udara

3.4.2 Analisis Pemantauan Intensitas Cahaya

Sensor BH1750 berhasil merekam variasi pencahayaan harian di dalam lingkungan terarium. Yang mana laboratorium dibiarkan tanpa lampu pencahayaan ruangan, instrumen ini juga sangat responsif merekam lonjakan intensitas cahaya secara drastis (mencapai hingga 808 Lux) yang menandakan aktifnya aktuator lampu LED secara otomatis. Kemampuan instrumen dalam merekam perubahan pencahayaan secara presisi ini sejalan dengan penelitian (Wahyu et al., 2021), yang menegaskan bahwa sensor intensitas cahaya yang responsif sangat mutlak diperlukan pada sistem kendali lingkungan cerdas untuk memastikan siklus pencahayaan buatan berjalan tepat waktu dan terpantau dengan akurat. .

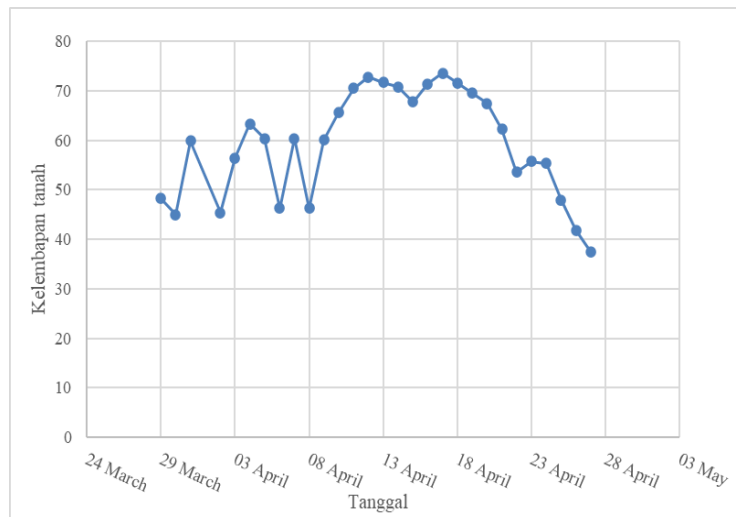


Gambar 11. Grafik Analisis Intensitas Cahaya

3.4.3 Analisis Pemantauan Kelembapan Tanah

Pergerakan kelembapan tanah mencerminkan siklus air mikro yang terjadi di dalam terarium tertutup. Berdasarkan data pemantauan, kelembapan tanah bergerak sangat dinamis, di mana pada awal pengujian nilainya berada di kisaran 45% hingga 63%. Memasuki pertengahan April, tingkat kelembapan terus merangkak naik dan bertahan di area jenuh air, dengan titik puncak tertinggi mencapai 74% pada tanggal 17 April 2026. Setelah melewati fase jenuh tersebut, kelembapan tanah menunjukkan tren penurunan secara bertahap hingga menyentuh titik terendahnya di angka 37% pada akhir masa pengujian (27 April). Angka

kelembapan yang bergerak naik-turun ini menunjukkan bahwa air di dalam sistem tertutup tidak pernah benar-benar hilang, melainkan terus mengalami siklus evaporasi dan kondensasi secara seimbang. Sistem kendali closed-loop terbukti bekerja secara otonom dalam mengelola siklus ini, di mana mekanisme kontrol otomatis sangat mutlak diperlukan untuk menjaga stabilitas kadar air tanah secara presisi tanpa memerlukan intervensi manusia secara terus-menerus (Setyawan *et al.*, 2024).



Gambar 12. Grafik Analisis Kelembapan Tanah

3.4.4 Analisis Respons Aktuator

Sistem pengendali closed-loop yang ditanamkan pada mikrokontroler NodeMCU ESP8266 terbukti berhasil memicu aktuator secara otonom untuk menjaga keseimbangan termodinamika terarium. Aktuator ultrasonic fogger bekerja secara spesifik menginjeksi uap air mikro ketika kelembapan udara turun di bawah batas minimum (50%) atau tanah terdeteksi kering. Metode pengkabutan ini menyebarkan kelembapan secara merata tanpa menimbulkan genangan air pada akar, sehingga sangat efektif menyeimbangkan kebutuhan air tanaman tanpa memberikan dampak kerusakan fisik pada lingkungan tertutup (Lestari *et al.*, 2023; Romadan *et al.*, 2024). Sebaliknya, aktuator lampu LED yang memiliki fungsi ganda sebagai sumber cahaya fotosintesis sekaligus pemanas pasif akan menyala secara otomatis (mencapai iluminansi hingga 808 Lux) ketika sensor mendeteksi kelembapan tanah mencapai titik jenuh (70%). Tambahan radiasi termal dari lampu LED ini terbukti menjadi solusi yang sangat efisien untuk mengendalikan tingkat kejenuhan air dan mempercepat proses penguapan kelebihan air kembali ke udara secara aman (Setyawan *et al.*, 2024).



Gambar 13. Analisis Respons Aktuator

4. KESIMPULAN

Berdasarkan perancangan, karakterisasi, kalibrasi, pengujian, dan analisis data yang telah dilakukan pada sistem monitoring terarium tertutup, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Sistem monitoring dan pengendalian otomatis pada terarium tertutup telah berhasil direalisasikan menggunakan mikrokontroler NodeMCU ESP8266 sebagai pusat kendali yang terintegrasi dengan rangkaian sensor (Soil Moisture MD0869, DHT11, dan BH1750) serta aktuator (*Ultrasonic Fogger* dan Lampu LED 12 Volt DC).
2. Penerapan metode kalibrasi regresi linear terbukti secara signifikan meningkatkan presisi dan akurasi pembacaan sensor. Hal ini dibuktikan dengan perolehan nilai *Mean Absolute Error* (MAE) yang sangat rendah, yaitu sebesar 3,07% untuk kelembapan tanah, 0,37°C untuk suhu udara, 1,35% untuk kelembapan udara, dan 2,62 Lux untuk intensitas cahaya.
3. Instrumen terbukti andal dalam pemantauan jangka panjang, di mana data *time-series* dari keempat parameter lingkungan berhasil diakuisisi dan ditransmisikan secara *real-time* ke platform IoT ThingSpeak tanpa jeda koneksi yang berarti selama satu bulan pengujian.
4. Algoritma kendali tertutup (*closed-loop control*) sukses bekerja secara otonom untuk mempertahankan keseimbangan termodinamika terarium. Aktuator *ultrasonic fogger* terbukti responsif menginjeksi uap air (terekam menyala pada 6 dan 8 April) ketika kelembapan udara turun ($\leq 50\%$) atau tanah mengering. Sebaliknya, aktuator lampu LED sukses menyala secara otomatis (terekam aktif pada 11 hingga 20 April dengan intensitas hingga 808 Lux) untuk memberikan paparan energi termal guna mempercepat evaporasi saat kelembapan tanah mencapai batas kejenuhan ($\geq 70\%$).
5. Sebagai kemungkinan pengembangan selanjutnya, sistem ini dapat disempurnakan dengan menambahkan modul *Micro SD Card Adapter* sebagai media penyimpanan data lokal (*data logger*) cadangan, serta menerapkan logika kendali cerdas tingkat lanjut (seperti *Fuzzy Logic Control*) agar transisi aktuasi relai menjadi lebih adaptif terhadap perubahan lingkungan.
6. Berdasarkan performa operasional dan tingkat akurasi yang dihasilkan, sistem kendali mikroklimat cerdas berbasis IoT ini memiliki potensi implementasi praktis yang luas, tidak hanya terbatas pada pemeliharaan terarium hias, tetapi juga sangat aplikatif untuk dijadikan sarana monitoring pertumbuhan tanaman, mendukung kegiatan konservasi spesies sensitif, penelitian ekosistem mikro, hingga pengembangan model smart greenhouse skala kecil secara efisien dan berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- Aosong Electronics Co., Ltd. n.d. "DHT11 Digital Relative Humidity & Temperature Sensor Datasheet."
- Aosong Electronics Co., Ltd. n.d. "Digital-Output Relative Humidity & Temperature Sensor/Module DHT22 (DHT22 Also Named as AM2302)."
- Lee, Hoochang, Jiseock Kang, Sungjung Kim, Yunseok Im, Seungsung Yoo, dan Dongjun Lee. 2020. "Long-Term Evaluation and Calibration of Low-Cost Particulate Matter (PM) Sensor." *Sensors* 20(13):3617. doi:10.3390/s20133617.
- Lestari, Hanis Adila, Anri Kurniawan, dan Triat Adi Yuwono. 2023. "Otomatisasi Ultrasonik Fogger Budidaya Selada Keriting Hijau Secara Fogponik di Pertanian Indoor berbasis Internet of Things (IoT)." *Jurnal Ilmiah Inovasi* 23(2):111–17. doi:10.25047/jii.v23i2.3616.
- Liu, Yu, Zeng Cui, Ze Huang, Manuel López-Vicente, dan Gao-Lin Wu. 2019. "Influence of Soil Moisture and Plant Roots on the Soil Infiltration Capacity at Different Stages in Arid Grasslands of China." *CATENA* 182:104147. doi:10.1016/j.catena.2019.104147.
- Manurung, Sakira Putri, Sanas Tasia Sihalohe, Cahya Putri Ramadhani, Meilinda Suriani Harefa, dan Syukri Hidayat. 2023. "Pembuatan Terarium Sebagai Miniatur Ekosistem." *Jurnal wilayah, kota dan lingkungan berkelanjutan* 2(2):75–79. doi:10.58169/jwikal.v2i2.240.
- Morris, Alan S. 2001. *Measurement and Instrumentation Principles*. Oxford [England] Boston: Butterworth-Heinemann.

- Nurwarsito, Heru, dan Resnu Wahyu Adaby. 2024. "Pengembangan Internet Of Things (IOT) Dalam Perekaman Data Iklim Mikro Dengan Platform Thingsboard." *Jurnal Teknologi Informasi dan Ilmu Komputer* 11(6):1385–98. doi:10.25126/jtiik.1168987.
- ROHM Co., Ltd. 2009. *BH1750FVI Ambient Light Sensor IC Datasheet*. No.09046EBT01, Rev.B. Kyoto, Japan. <https://www.rohm.com>.
- Romadan, Diva Putra, Veri Arinal, Frensis Matheos Sarimole, dan Tundo Tundo. 2024. "Prototipe Sistem Monitoring Kelembapan Tanah pada Tanaman Cabai Berbasis Internet of Things dengan Metode Fuzzy Logic Menggunakan NodeMCU Esp8266, Blynk dan Thingspeak." *MALCOM: Indonesian Journal of Machine Learning and Computer Science* 5(1):130–40. doi:10.57152/malcom.v5i1.1600.
- Satriadi, Arifaldy. 2019. "Perancangan home automation berbasis NodeMcu." *TRANSIENT* 8(1). <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/transient>.
- Setyawan, Dodi Yudo, Lia Rosmalia, Melia Gripin Setiawati, dan Retno Dwi. 2024. "Kalibrasi Sensor Suhu Udara, Kelembaban dan pH Tanah Menggunakan Metode Linear regression." 19(1).
- Tiyas, Anis Wahyumulyaning, Danang Erwanto, dan Iska Yanuartanti. 2025. "Peningkatan Akurasi Sensor Suhu dan Kelembaban DHT11 dengan Kalibrasi Suhu Berbasis IoT pada Platform Thingspeak." *Jurnal Pendidikan dan Teknologi Indonesia* 5(3):625–33. doi:10.52436/1.jpti.709.
- Ulinnuha, Zulfa, dan Noor Farid. 2023. "Pengaruh kelembaban media terhadap pertumbuhan dan evapotranspirasi lima varietas anggrek dendrobium." *AGROMIX* 14(1):96–103. doi:10.35891/agx.v14i1.3014.
- Wahyu, Syafrima, Mohamad Syafaat, Agnes Yuliana, dan Revi Meliyani. 2021. "Aplikasi Sensor BH1750 Untuk Sistem Monitoring Pertumbuhan Tanaman Cabai Menggunakan Arduino Bertenaga Surya Terintegrasi Internet of Things (IoT)." *Jurnal Teori dan Aplikasi Fisika* 9(1):71–78. doi:10.23960/jtaf.v9i1.2713.
- Walpole, Ronald E., Raymond H. Myers, Sharon L. Myers, dan Keying Ye. 2012. *Probability & statistics for engineering and the sciences*. 9th edition. Boston, MA, USA: Pearson Education, Inc.
- Zahro, Fatimatus, Kendid Mahmudi, dan Sudarti Sudarti. 2025. "Analisis konsep fisika pada sensor kelembaban tanah dalam monitoring irigasi pertanian." *Jurnal Multidisiplin Inovatif* 9.