

Kalibrasi dan Validasi Sensor pH E-201C-Blue dan TDS Meter V1 pada Sistem Hidroponik Otomatis Berbasis IoT di Aswana Hidroponik

Mikha El Charisto Rahardjo, Bernaditus Yordan Baraga, Vincensius Agung Wibowo Joyopranoto,
Christy Mahendra

Program Studi Teknik Informatika Sekolah Tinggi Ilmu Komputer Yos Sudarso
Alamat: Jl. SMP5, Karangklesem, Purwokerto Selatan, Banyumas, Jawa Tengah, 53144
Telp: (0281) 6845088, Fax: (0281) 6845089, Mobile: +62 896 6915 1295
Website: stikomys.ac.id, E-mail: mikhaelcharisto15@gmail.com

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk melakukan kalibrasi dan validasi sensor pH E-201C-Blue dan TDS Meter V1 yang diterapkan pada sistem hidroponik otomatis berbasis Internet of Things (IoT) di Aswana Hidroponik, Purwokerto. Proses kalibrasi dilakukan menggunakan metode multi-titik dengan larutan buffer standar (pH 4, 7, dan 10) serta larutan TDS 500 hingga 1500 ppm untuk mendapatkan akurasi optimal. Mikrokontroler ESP32 digunakan sebagai pusat kendali dan pengirim data ke dashboard monitoring berbasis cloud. Hasil pengujian menunjukkan bahwa setelah kalibrasi, pembacaan sensor memiliki tingkat akurasi tinggi dengan nilai koefisien korelasi (R^2) di atas 0,98 dan error rata-rata di bawah 5%. Temuan ini membuktikan bahwa sensor komersial berbiaya rendah dapat diandalkan untuk sistem hidroponik otomatis, sehingga mendukung efisiensi waktu dan peningkatan hasil panen di Aswana Hidroponik, Purwokerto.

Kata Kunci: hidroponik otomatis, sensor pH, TDS, IoT, kalibrasi

Abstract

This study aims to calibrate and validate the pH E-201C-Blue sensor and TDS Meter V1 implemented in an IoT-based automatic hydroponic system at Aswana Hydroponic, Purwokerto. The calibration process was carried out using a multi-point method with standard buffer solutions (pH 4, 7, and 10) and TDS solutions ranging from 500 to 1500 ppm to achieve optimal accuracy. An ESP32 microcontroller was used as the main controller and data transmitter to a cloud-based monitoring dashboard. The results showed that after calibration, the sensor achieved high accuracy with a correlation coefficient (R^2) above 0.98 and an average error below 5%. These findings indicate that low-cost commercial sensors can provide reliable performance in automated hydroponic system, supporting time efficiency and improving crop productivity at Aswana Hydroponic, Purwokerto.

Keyword: automatic hydroponics, pH sensor, TDS, IoT, calibration

1 PENDAHULUAN

Dalam menghadapi tantangan global seperti keterbatasan lahan pertanian, pertumbuhan populasi yang cepat, dan perubahan iklim yang memengaruhi ketersediaan air, sistem pertanian modern menjadi kebutuhan mendesak untuk menjamin ketahanan pangan [1]. Salah satu solusi yang semakin populer dan efektif adalah hidroponik, sebuah metode budidaya tanaman tanpa menggunakan tanah yang menawarkan efisiensi air yang tinggi serta hasil panen yang lebih konsisten dan berkualitas [2]. Keberhasilan budidaya hidroponik sangat bergantung pada pemeliharaan lingkungan nutrisi yang stabil, dimana dua parameter kritis yang harus dijaga secara ketat adalah derajat keasaman (pH) dan kandungan *Total Dissolved Solids* (TDS), yang merepresentasikan konsentrasi nutrisi terlarut. Fluktuasi kecil pada parameter ini dapat langsung memengaruhi penyerapan nutrisi oleh tanaman

dan, pada akhirnya, menurunkan hasil panen secara signifikan [3].

Untuk mengatasi keterbatasan control manual tersebut, munculnya Internet of Things (IoT) menawarkan solusi otomatisasi yang transformatif bagi sektor pertanian [4]. Dengan memanfaatkan mikrokontroler seperti ESP32 dan sensor terintegrasi, petani kini dapat memantau parameter air (pH dan TDS) secara real-time dan mengakses data melalui *cloud monitoring* dari jarak jauh [5]. Integrasi IoT tidak hanya meningkatkan efisiensi waktu, tetapi juga memungkinkan penyesuaian nutrisi yang cepat dan presisi, yang sangat vital bagi pertumbuhan tanaman. Meskipun demikian, adopsi teknologi ini, khususnya di tingkat pelaku usaha kecil dan menengah seperti di mitra kami yaitu Aswana Hidroponik, sering kali terkendala oleh biaya investasi yang tinggi untuk sensor kualitas industri/laboratorium yang berakurasi tinggi. Alternatifnya, penggunaan sensor komersial

berbiaya rendah (seperti sensor pH E-201C-Blue dan TDS Meter V1) menjadi pilihan yang lebih ekonomis. Namun, keandalan dan akurasi pembacaan sensor murah ini seringkali diragukan dan memerlukan validasi ketat sebelum dapat diterapkan dalam lingkungan produksi nyata [6].

Tinjauan terhadap literatur menunjukkan bahwa telah banyak penelitian yang berhasil mengimplementasikan sistem otomatisasi hidroponik berbasis IoT (misalnya, [7] yang mengintegrasikan monitoring dan *dosing* nutrisi, dan [8] yang mengembangkan sistem kontrol *fuzzy logic* untuk hidroponik). Sebagian besar studi ini berhasil membuktikan fungsionalitas sistem secara keseluruhan (*system functionality*) dan melaporkan peningkatan efisiensi budidaya [9].

2 LANDASAN TEORI

2.1 KONSEP DASAR HIDROPONIK

Hidroponik (berasal dari bahasa Yunani hydro yang berarti air, dan ponos yang berarti kerja) didefinisikan sebagai metode budidaya tanaman tanpa menggunakan media tanah, di mana tanaman memperoleh nutrisi esensial melalui larutan air yang diperkaya unsur hara [10]. Dalam konteks penelitian ini, sistem hidroponik yang diterapkan di Aswana Hidroponik menggunakan metode NFT (*Nutrient Film Technique*) [11].

Derajat Keasaman (pH) adalah logaritma negatif dari konsentrasi ion hidrogen (H^+) dalam larutan, yang mengindikasikan tingkat keasaman atau kebasaan. Dalam hidroponik, pH harus dipertahankan dalam rentang ideal 5.5 hingga 6.5 [12]. Pemeliharaan pH sangat krusial karena ia mengatur ketersediaan dan penyerapan unsur hara oleh akar tanaman. Jika pH terlalu tinggi (basa), unsur hara mikro seperti Besi (Fe) dan Mangan (Mn) menjadi tidak tersedia (lockout). Sebaliknya, jika pH terlalu rendah (asam), beberapa unsur dapat menjadi toksik bagi tanaman [13].

Total Dissolved Solids (TDS) mengukur jumlah total partikel terlarut (termasuk garam mineral, ion, dan unsur hara) dalam air, yang umumnya diukur dalam satuan milligram per liter (mg/L atau ppm) atau diestimasi dari konduktivitas listrik (EC - *Electrical Conductivity*) (mS / cm) [14]. Dalam hidroponik, TDS secara langsung merefleksikan konsentrasi nutrisi yang tersedia bagi tanaman. Rentang TDS ideal bervariasi tergantung jenis tanaman, tetapi umumnya berada dalam kisaran 500 hingga 1500 ppm [15].

2.2 MODEL KALIBRASI SENSOR MENGGUNAKAN REGRESI LINIER

Metode kalibrasi yang digunakan adalah kalibrasi multi-titik (*multi-point calibration*) dengan pendekatan model Regresi Linier Sederhana. Metode ini mengasumsikan adanya hubungan linier yang kuat antara variable independent (X), yaitu sinyal mentah sensor, dengan variabel dependen (Y), yaitu nilai terukur dari larutan standar [16]. Model matematis dari hubungan ini diformulasikan sebagai berikut:

$$\hat{Y} = mX + c \quad (1)$$

Keterangan:

- $\hat{Y}$ = Nilai Parameter prediksi yang terkalibrasi (pH atau TDS)
- X = Nilai sinyal mentah yang dibaca oleh sensor
- m = Gradien (kemiringan) kurva regresi, yang merepresentasikan sensitivitas sensor.
- c = Intersep (titik potong) kurva, yang merepresentasikan nilai *offset* sensor.

Parameter m dan c diperoleh dengan mengukur beberapa titik data menggunakan larutan standar yang telah diketahui nilainya (misalnya, larutan *buffer* pH 4.0, 7.0, dan 10.0 untuk sensor pH). Koefisien m dan c kemudian dihitung menggunakan Metode Kuadrat Terkecil. Metode ini bekerja dengan cara mencari nilai m dan c yang dapat meminimalkan total kuadrat dari *error* (selisih) antara nilai standar aktual (Y) dan nilai prediksi model ($\hat{Y}$).

2.3 Evaluasi Model: Koefisien Determinasi (R^2)

Untuk mengevaluasi validitas dan kesesuaian model dari kalibrasi regresi linier yang dibangun, digunakan metrik Koefisien Determinasi (R^2). Secara statistik, R^2 mengukur proporsi varian pada variabel dependen (Y) yang dapat dijelaskan atau diprediksi oleh variabel independen (X) melalui model regresi.

Nilai R^2 dihitung menggunakan selisih kuadrat total (SS_{tot}) dan selisih kuadrat sisaan (SS_{res}), dengan formula sebagai berikut [17]:

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{res}}{SS_{tot}} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (2)$$

Keterangan:

- Y_i = Nilai standar aktual dari titik data ke- i .

- $\hat{Y}_i$ = Nilai prediksi yang dihasilkan oleh model regresi ($mX_i + c$)
- $\bar{Y}$ = Nilai rata-rata dari seluruh nilai standar aktual (Y_i)
- n = Jumlah total titik data kalibrasi

Nilai R^2 berkisar antara 0 hingga 1. Dalam konteks kalibrasi sensor, nilai R^2 yang mendekati 1 sangat diharapkan. Ini mengindikasikan bahwa model regresi linier yang diperoleh sangat baik dalam merepresentasikan data pengukuran, yang berarti sensor memiliki tingkat linearitas dan akurasi prediksi yang tinggi setelah dikalibrasi.

2.4 EVALUASI AKURASI: MEAN ABSOLUTE PERCENTAGE ERROR

Tahap ini melibatkan perbandingan pembacaan sensor yang telah dikalibrasi (Y_{sensor}) dengan alat ukur referensi presisi tinggi (*gold standard*) ($Y_{standar}$) secara bersamaan pada beberapa sampel uji. Untuk mengukur tingkat akurasi secara kuantitatif akan menggunakan metrik *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE). MAPE menghitung rata rata dari persentase selisih absolut (kesalahan) antara nilai yang diukur sensor dan nilai standar, yang ideal untuk mengevaluasi akurasi prediksi [18]. MAPE dihitung menggunakan formula berikut:

$$MAPE (\%) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{Y_{standar,i} - Y_{sensor,i}}{Y_{standar,i}} \right| \times 100\% \quad (3)$$

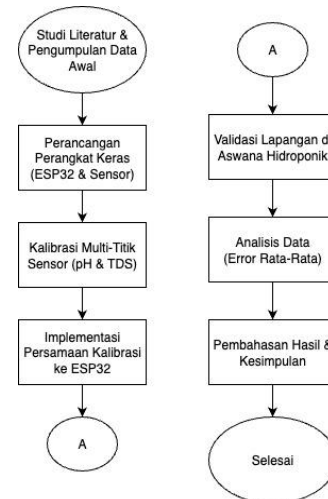
Keterangan:

- $Y_{sensor,i}$ = Pembacaan sensor yang telah dikalibrasi pada pengujian ke- i
- $Y_{standar,i}$ = Pembacaan alat ukur *gold standard* pada pengujian ke- i .
- n = Jumlah total sampel data pengujian

Nilai MAPE yang rendah (misalnya, target di bawah 5%) mengindikasikan bahwa sistem sensor yang dikembangkan memiliki tingkat kesalahan yang minimal dan dapat diandalkan untuk menggantikan pengukuran manual, dengan akurasi yang mendekati alat ukur standar.

3 METODOLOGI PENELITIAN

Metode yang dilakukan pada penelitian ini meliputi beberapa proses dan akan ditampilkan dalam bentuk chart pada Gambar 1.



Gambar 1 Flowchart Penelitian

3.1 STUDI LITERATUR

Tahap ini merupakan tahap pengumpulan beberapa referensi yang diperoleh melalui jurnal atau paper mengenai algoritma kontrol yang efektif mengenai kalibrasi dan validasi.

3.2 PERANCANGAN PERANGKAT KERAS

Berikut ini merupakan perangkat keras yang digunakan pada penelitian:

a. Mikrokontroler ESP32

ESP32 dipilih sebagai mikrokontroler utama (*Core Processing Unit*) dalam perancangan sistem otomatis hidroponik ini. Pemilihan ESP32 didasarkan pada kapabilitas ganda (*dual-core*) yang bisa digunakan dalam kinerja pemrosesan data sensor pH dan TDS untuk eksekusi algoritma kontrol. Untuk keunggulan ESP32 ada di konektivitas, kemampuan pemrosesan data, serta slot input dan output yang lengkap [5]. Mikrokontroler ini nantinya akan digunakan sebagai pengolahan data dari hasil pembacaan dari sensor.

b. Sensor TDS Meter V1

TDS Meter V1 berfungsi sebagai sensor nutrisi dimana untuk mengukur konsentrasi total ion terlarut dalam larutan hidroponik. Sensor ini bekerja berdasarkan prinsip Konduktivitas Listrik (EC), dimana EC diubah menjadi nilai TDS (ppm) menggunakan faktor konversi yang telah ditetapkan. Fungsi sensor ini sedikit krusial, bisa untuk akuisisi data, kalibrasi dan aksi kontrol untuk mentrigger sebuah output yang di pasang [6]. Sensor ini

nantinya digunakan untuk mengukur ppm dalam larutan yaitu larutan pupuk AB Mix.

c. TDS Meter

TDS Meter merupakan alat ukur yang dimana untuk mengukur nilai dari total *dissolved solid* atau jumlah padatan terlarut dalam air. Cara kerja TDS Meter ini yaitu dengan cara mengubah nilai arus pengukuran menjadi satuan ppm (*parts per million*). Alat ini nantinya digunakan sebagai pembanding dengan sensor TDS Meter V1.

d. Sensor pH E-201C-Blue

Sensor ini adalah sebuah elektroda kaca yang berfungsi untuk mengukur tingkat keasaman atau kebasaan (pH) larutan nutrisi secara akurat. Cara kerja sensor ini yaitu dari potensial listrik (voltage) yang proporsional dengan konsentrasi ion hydrogen (H^+) dalam larutan, lalu sinyal tersebut diolah lalu akan dibaca oleh ESP32 [12]. Sensor ini nanti digunakan untuk mengukur tingkat keasaman atau kebasaan air.

e. pH Meter (Gold Standard)

pH Meter merupakan sebuah alat ukur yang mengukur nilai tingkat keasaman atau kebasaan pada air yang cara kerjanya itu menggunakan nilai arus yang digunakan lalu di konversi menjadi hasilnya akan menjadi satuan pH. Alat ini akan digunakan sebagai pembanding dengan *Sensor pH E-201C-Blue*.

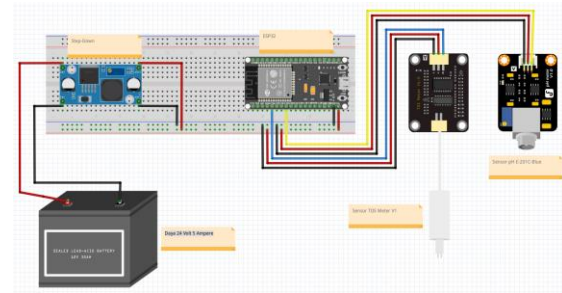
f. Step-Down LM2596

Modul *Step-Down* ini berfungsi sebagai regulator tegangan untuk memastikan semua komponen digital menerima daya yang stabil sesuai dengan kebutuhan input dan output.

g. Catu Daya

Power Supply atau catu daya adalah alat yang fungsinya sebagai pengubah input tegangan AC menjadi DC. *Power Supply* yang akan digunakan pada penelitian ini sebesar 24 V yang memiliki arus 15 A. *Power Supply* ini nantinya digunakan untuk menghidupkan mikrokontroler serta sensor-sensor yang akan digunakan.

Tahap ini merupakan tahap rancangan dari rangkaian yang akan digunakan sebagai pengujian. Bentuk rangkaian ini ditunjukkan pada Gambar 2 rangkaian skematik.



Gambar 2 Rangkaian Skematik

Catu daya akan mengeluarkan 24 V 15 A, setelah itu nanti akan di masukkan ke input Step-Down LM2596, lalu di bagian Step-Down akan terdapat regulator yang dapat diputar, dan di putar hingga tegangan ke 3.3 V karena yang aman untuk sensor dan mikrokontroler ESP32. Output dari Step-Down berupa VCC dan GND akan langsung disambungkan ke ESP32, sensor pH dan sensor TDS. Untuk pin sinyal sensor pH akan berada di pin 33, lalu untuk sensor TDS akan berada di pin 34 agar keduanya bisa mengirimkan sinyal analog kepada mikrokontroler ESP32.

3.3 KALIBRASI SENSOR PH & TDS

Pada tahap ini nantinya akan mengkalibrasi dimana hasil dari pembacaan sensor pH dan TDS, lalu nanti nilainya akan digunakan untuk ke persamaan di program ESP32.

3.3.1 PROSES KALIBRASI SENSOR PH E-201C-Blue

Di sini merupakan tahap kalibrasi berdasarkan prinsip elektroda kaca yang menghasilkan tegangan berbeda dengan adanya perubahan konsentrasi ion hydrogen (H^+). Metode ini menggunakan tiga titik *buffer* dengan menjamin akurasi yang relevan sekitar pH 5.5 hingga pH 6.5. Untuk persamaan konversi linear didapat berdasar rumus di bawah ini :

$$pH_{\text{terkalibrasi}} = m \times X_{\text{mentah}} + c \quad (4)$$

Dengan X_{mentah} sebagai pembacaan sinyal mentah sensor, dan $pH_{\text{terkalibrasi}}$ adalah nilai pH yang sebenarnya.

3.3.2 PROSES KALIBRASI SENSOR TDS METER V1

Pada proses kalibrasi sensor TDS ini akan menggunakan larutan dengan konsentrasi berbeda yaitu 500 ppm, 1000 ppm, dan 1500 ppm. Di tahap

pertama ada kompensasi suhu dengan rumus di bawah ini [16]:

$$EC_{25^{\circ}C} = \frac{EC_T}{1 + \alpha(T - 25^{\circ}C)} \quad \text{atau} \quad \text{Sinyal}_{\text{koreksi}} = \frac{\text{Sinyal}_{\text{mentah}}}{1 + \alpha(T - 25^{\circ}C)} \quad (5)$$

Keterangan:

- $EC_{25^{\circ}C}$ (Sinyal_{koreksi}) = EC pada suhu referensi 25°C
- EC_T (Sinyal_{mentah}) = EC pada suhu pengukuran T.
- α = Koefisien kompensasi suhu (umumnya 0.019 per °C)

Di tahap kedua ada perhitungan regresi linier dengan rumus di bawah ini:

$$TDS_{\text{ppm}} = m_{TDS} \times \text{Sinyal}_{\text{koreksi}} + c_{TDS} \quad (6)$$

3.4 ANALISIS DATA

Pada tahap ini, akan dilakukan sebuah pengujian dengan mengumpulkan data langsung dari lapangan di mitra kami yaitu Aswana Hidroponik. Di sini akan dilakukan beberapa skenario yaitu pengambilan data akan dilakukan selama periode 7 hari untuk mengamati parameter yang berubah-ubah karena penyerapan nutrisi oleh tanaman atau faktor lain. Setelah itu gunakan sampel air dan pengukuran manual menggunakan alat standar dari pH dengan merek pH Meter Digital dari mediatech dan TDS Meter dengan merek TDS dan EC Meter A1 dari mediatech. Hasilnya nanti akan di catat manual sebagai $Y_{\text{standar},i}$ dan $Y_{\text{standar},i}$ ini akan digunakan sebagai konfirmasi bahwa akurasi sistem berada dalam batas toleransi ditetapkan (MAPE < 5%) [17].

4 HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bagian ini akan dijelaskan hasil dari penelitian ini dalam bentuk gambar, grafik, dan table yang dapat mempermudah dalam memperhatikan isi dari hasil penelitian ini. Untuk alat pendukung yang digunakan yaitu ada pH Meter Digital, TDS Meter, air murni, dan serbuk buffer pH.



Gambar 3 pH Meter, TDS Meter, air murni, serbuk buffer pH

Alat tersebut digunakan sebagai kalibrasi dan sekaligus menjadi Y_{standar} yang akan digunakan sebagai pembandingan dan analisa error.

4.1 KALIBRASI SENSOR TDS

Proses yang dilakukan di kalibrasi ini adalah melakukan pembacaan nilai ppm dari TDS sebanyak sepuluh kali dengan waktu yang berbeda. Hasil dari pembacaan nilai sensor TDS untuk data mentah di ambil sepuluh nilai yang di ambil dengan waktu berbeda ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1 Sampel data mentah sensor TDS

No	Suhu (C)	TDS 500 ppm (V)	TDS 1000 ppm (V)	TDS 1500 ppm (V)
1	26,1	1,121	2,053	2,991
2	26,0	1,125	2,050	2,988
3	26,2	1,122	2,054	2,990
4	26,1	1,120	2,051	2,993
5	26,0	1,123	2,052	2,989
6	26,2	1,124	2,055	2,991
7	26,1	1,121	2,050	2,992
8	26,0	1,125	2,053	2,988
9	26,2	1,122	2,051	2,990
10	26,1	1,120	2,054	2,993

Berdasarkan data mentah yang di ambil dari sensor TDS dengan waktu berbeda, lalu setelah di didapatkan sebuah pembacaan rata-rata yang di dapat yaitu terdapat pada Tabel 2 di bawah ini.

Tabel 2 Hasil nilai konduktivitas dan rata-rata

TDS Standar (Y standar) (ppm)	Nilai Konduktivitas Standar (mS/cm)	Suhu Rata-Rata (C)	Nilai Rata-Rata Voltage (X)
500	0,833	26,1	1,1223
1000	1,667	26,1	2,0523
1500	2,500	26,1	2,9905

Tabel diatas ini hasil rata-rata yang didapatkan dari Tabel 1. Untuk nilai konduktivitas standar di ambil dari pembagian antara TDS Standar dibagi dengan k yang dimana k ini saya ambil nilainya diangka 0,60. Setelah itu dibulatkan dengan di kalikan 1000 sehingga nilai konduktivitas didapat dari tiga titik untuk kalibrasi sensor TDS. Setelah itu untuk nilai dari rata-rata voltage (X) dan $Y_{standar}$ akan digunakan untuk menghitung dan dijadikan persamaan linear (kalibrasi).

$$m = \frac{\sum (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sum (X_i - \bar{X})^2} \quad (7)$$

Untuk nilai X diambil dari nilai rata-rata voltage, lalu untuk Y diambil dari nilai $Y_{standar}$ yang di ambil dari tiga titik 500, 1000, dan 1500. Nanti diperoleh nilai m . Setelah itu akan menghitung nilai *intercept* nya dimana dengan rumus di bawah ini.

$$c = \bar{Y} - m\bar{X} \quad (8)$$

Nilai dari Y itu akan didapat dari rata-rata TDS standar tiga titik, lalu m di ambil dari nilai gradient diatas, lalu untuk X ambil nilai dari rata-rata voltage. Maka akan didapatkan persamaan kalibrasi TDS.

$$\hat{Y} = (535.81)X - 101.03 \quad (9)$$

Nilai persamaan diatas bisa langsung digunakan dan dimasukkan kedalam pemrograman untuk kalibrasi sensor TDS. Dengan nilai X akan diinput sesuai voltase yang digunakan pada sensor TDS.

4.2 KALIBRASI SENSOR PH

Proses kalibrasi sensor pH ini hampir sama seperti sensor TDS, yaitu akan dilakukan pembacaan nilai pH dari sensor pH sebanyak sepuluh kali dengan waktu yang berbeda. Pada Tabel 3 di bawah ini akan ditampilkan data mentahnya.

Tabel 3 Sampel data mentah sensor pH

No	Suhu Larutan (C)	pH Standar 4.0 (V)	pH Standar 7.0 (V)	pH Standar 10.0 (V)
1	25,5	2,502	1,999	1,507
2	25,4	2,500	2,001	1,510
3	25,6	2,503	2,000	1,508
4	25,5	2,501	2,002	1,512
5	25,4	2,499	1,998	1,509
6	25,6	2,500	1,999	1,510
7	25,5	2,501	2,001	1,508
8	25,4	2,502	2,000	1,511
9	25,6	2,500	1,998	1,509
10	25,5	2,501	2,001	1,510

Berdasarkan data mentah diatas setelah itu dari sepuluh nilai data mentah akan dirata-rata berdasarkan tiga titik nilai sebagai kalibrasi, yang akan ditampilkan pada Tabel 4.

Tabel 4 Hasil nilai rata-rata dan standar deviasi

pH Standar ($Y_{standar}$)	Suhu Rata-Rata (C)	Nilai Rata-Rata Voltage (X)	Standar Deviasi (SD)
4,00	25,5	2,5009	0,0012
7,00	25,5	2,0000	0,0014
10,00	25,5	1,5094	0,0014

Hasil dari table diatas adalah rata-rata dari suhu, dan voltage dari masing-masing titik pH. Lalu untuk bagian standar deviasi di sini perannya berfungsi sebagai ukuran presisi atau stabilitas dari pembacaan sensor pH. Setelah itu nilai X dan $Y_{standar}$ akan digunakan sebagai dasar perhitungan untuk dijadikan sebagai persamaan linear (kalibrasi).

$$m = \frac{\sum (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sum (X_i - \bar{X})^2} \quad (10)$$

Nilai X di sini akan diambil dari nilai rata-rata voltage dari tiga titik yaitu 4.0, 7.0, dan 10.0. Setelah nilai m didapat maka selanjutnya mencari nilai *intercept* nya yang biasa disimbolkan dengan “ c ” dimana dengan rumus di bawah ini.

$$c = \bar{Y} - m\bar{X} \quad (11)$$

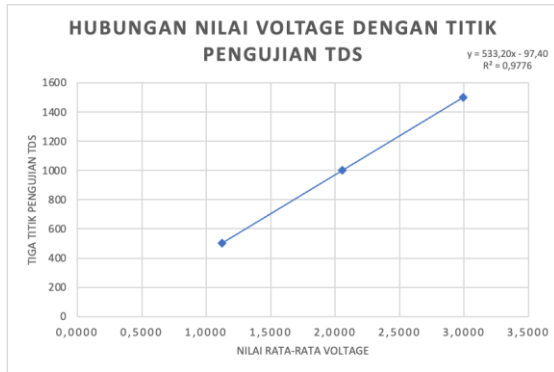
Untuk nilai Y di sini sebagai nilai dari rata-rata pH standar tiga titik, lalu untuk m diambil dari nilai gradient yang sebelumnya sudah dicari. Setelah itu bagian X diambil dari nilai rata-rata voltage. Maka persamaan kalibrasi pH sudah didapatkan.

$$\hat{Y} = (-6.0501)X + 19.1298 \quad (12)$$

Setelah itu persamaan linear (kalibrasi) bisa langsung diterapkan dimasukkan ke dalam pemrograman supaya sensor pH menjadi akurat untuk pembacaannya.

4.3 ANALISIS REGRESI LINIER KALIBRASI SENSOR TDS

Berdasarkan grafik persamaan pada Gambar 4 di bawah ini, dapat dilihat bahwa nilai koefisien determinasi (R^2) menunjukkan nilai yang mendekati 1.

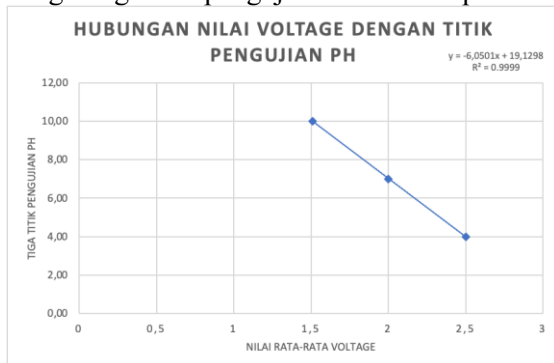


Gambar 4 Grafik hubungan nilai rata-rata voltage dengan tiga titik pengujian TDS

Dapat dilihat dari grafik diatas, untuk nilai koefisien R^2 berada di angka 0.9976. Nilai ini menunjukkan bahwa persamaan kalibrasi yang digunakan pada penelitian ini dapat berfungsi dengan baik, karena memiliki tingkat linieritas tinggi.

4.4 ANALISIS REGRESI LINIER KALIBRASI SENSOR PH

Pada Gambar 5 di bawah ini bisa dilihat bahwa nilai koefisien determinasi (R^2) di sini juga menunjukkan nilai yang mendekati 1, yang ditentukan berdasarkan nilai rata-rata voltage dengan tiga titik pengujian dari sensor pH.



Gambar 5 Grafik hubungan nilai rata-rata voltage dengan tiga titik pengujian pH

Dari grafik diatas bisa dilihat bahwa nilai untuk koefisien R^2 berada di angka 0.9999 yang artinya bahwa persamaan kalibrasi yang digunakan pada penelitian ini dapat berfungsi dengan baik.

4.5 EVALUASI ERROR PERSAMAAN KALIBRASI SENSOR TDS

Untuk menguji keberhasilan sensor TDS yang telah dikalibrasi, sekarang akan dilakukan perbandingan antara pembacaan sensor TDS dengan pembacaan alat TDS Meter standar. Diperoleh data mentah sebanyak sepuluh data pada

Tabel 5 di bawah ini, yang akan dilakukan untuk menganalisis errornya.

Tabel 5 Data mentah perbandingan antara sensor TDS dan TDS Meter

No	TDS Standar (Ystandar) (ppm)	TDS Sensor (Ysensor) (ppm)	Error Absolut (Ysensor - Ystandar)	Persentase Error (%)
1	1020	1005	15	1,47%
2	1005	995	10	0,99%
3	980	998	18	1,84%
4	995	985	10	1,01%
5	1010	1025	15	1,49%
6	1030	1015	15	1,46%
7	1000	980	20	2,00%
8	985	965	20	2,03%
9	1008	990	18	1,79%
10	997	1012	15	1,50%

Dari data diatas dapat dilihat langsung untuk perbandingan dari kolom *error absolut*, lalu di buat persentase nya langsung. Setelah itu diperoleh hasil *error* yaitu berada di bawah 5%.

$$MAPE = \frac{15.58\%}{10} = 1.56\% \quad (13)$$

Dapat dilihat, bahwa rata-rata persentase *error* dari persamaan kalibrasi yang telah dimasukkan yaitu hanya sebesar 1.56%, dan di bawah ini terdapat salah satu gambar pada Gambar 6 ketika sedang melakukan pengesanan.



Gambar 6 Perbandingan TDS Meter dan Sensor TDS lewat monitor

Dari gambar diatas dapat dilihat, di sebelah kiri itu adalah alat TDS meter menunjukkan angka 293 ppm, dan di sebelah kanan ada sensor TDS yang outputnya yaitu 239.18 ppm.

4.6 EVALUASI ERROR PERSAMAAN KALIBRASI SENSOR PH

Selanjutnya untuk menguji keberhasilan dari sensor pH yang telah dikalibrasi maka akan dilakukan sebuah uji banding antara pembacaan sensor pH yang telah dikalibrasi dengan alat pH

Meter sebagai perbandingannya, lalu untuk data mentah akan dicatat sebanyak sepuluh kali, dan dapat dilihat pada Tabel 6 di bawah ini.

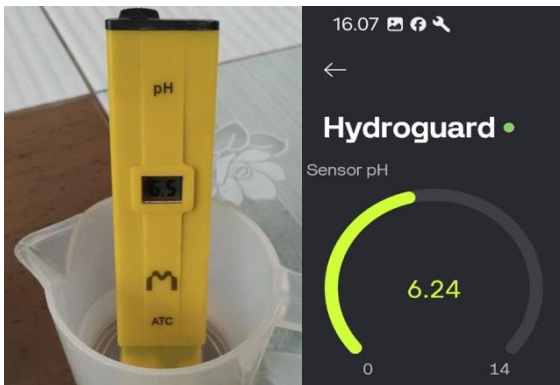
Tabel 6 Data mentah perbandingan antara sensor pH dan pH Meter

No	pH Standar (Ystandar)	pH Sensor (Ysensor)	Error Absolut (Ysensor - Ystandar)	Persentase Error (%)
1	6,05	6,13	0,08	1,32%
2	6,00	5,95	0,05	0,83%
3	5,90	5,98	0,08	1,36%
4	5,95	5,90	0,05	0,84%
5	6,10	6,15	0,05	0,82%
6	6,15	6,10	0,05	0,81%
7	6,08	6,16	0,08	1,32%
8	5,85	5,91	0,06	1,03%
9	5,93	6,00	0,07	1,18%
10	6,02	6,05	0,03	0,50%

Dapat dilihat untuk perbandingan dari pengujian antara sensor pH yang telah dikalibrasi dan alat pH meter, dan di kolom *error absoul* sudah terlihat jelas antara perbedaan dari perbandingannya.

$$MAPE = \frac{9.99\%}{10} \approx 1.00\% \quad (14)$$

Dari perhitungan diatas dapat dilihat bahwa rata-rata persentase *error* dari persamaan kalibrasi yang telah dimasukkan yaitu sebesar 1.00% dan di bawah ini terdapat gambar ketika melakukan perbandingan, ada di Gambar 7.



Gambar 7 Perbandingan pH Meter dan sensor pH melalui monitor

Dapat dilihat bahwa dari gambar diatas, di sebelah kiri ada pH meter disitu tertampil angka 6.5, dan di sebelah kanan ada dari sensor pH yang dilihat dari monitor yaitu 6.24.

5 KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil membuktikan bahwa dengan kalibrasi multi-titik dan adanya integrasi

dengan *Internet of Things (IoT)* dapat meningkatkan akurasi dari sensor komersial yang berbiaya rendah untuk bisa memonitoring parameter dalam budidaya hidroponik.

Kalibrasi multi-titik ini berhasil dikembangkan dengan hubungan antara sinyal mentah sensor, lalu dihitung nilai standarnya menggunakan regresi linear dari persamaan linier yang telah didapatkan dari data mentah. Hal ini bisa dibuktikan dengan perolehan R^2 yang sangat tinggi untuk kedua sensor, yaitu sensor TDS di angka 0.9976 dan sensor pH ada di angka 0.9999.

Untuk dari segi keandalan, kedua sensor ini juga sudah terbukti dengan adanya hasil validasi sensor yang dibuktikan dengan membandingkan antara sensor yang telah di kalibrasi dengan persamaan linier dengan alat ukur standar. Untuk rata-rata persentase error dari sensor TDS ada di angka 1.56% dan untuk rata-rata persentase error dari sensor pH ada di angka 1.00%.

Saran untuk penelitian selanjutnya yaitu perlu adanya pengujian validasi akurasi dan stabilitas sensor dalam periode waktu yang lebih panjang dari yang sudah diuji pada penelitian ini, misalnya satu siklus panen penuh, agar data yang didapatkan lebih banyak dan presisi untuk mengevaluasi degradasi sensor yang digunakan.

KEPUSTAKAAN

- [1] Muhammad, E. López Barrera, dan N. L. W. Wilson, "Annual Review of Resource Economics Global Food Demand: Overcoming Challenges to Healthy and Sustainable Diets," 2025, doi: 10.1146/annurev-resource-112923.
- [2] P. Lestari, A. Riduan, Elliyanti, dan D. Martino, "Pengembangan Sistem Pertanian Hidroponik pada Lahan Sempit Komplek Perumahan," *SAINTIFIK*, vol. 6, no. 2, hlm. 136–142, Agu 2020, doi: 10.31605/saintifik.v6i2.259.
- [3] M. K. Opung, G. Wijana, dan I. M. Sukewijaya, "Pengaruh Electrical Conductivity (EC) dan Jumlah Bibit per Net Pot terhadap Pertumbuhan dan Hasil Tanaman Pakcoy (*Brassica rapa* L.) pada Hidroponik Deep Flow Technique," *Agro Bali : Agricultural Journal*, vol. 7, no. 1, hlm. 276–285, Mar 2024, doi: 10.37637/ab.v7i1.1342.
- [4] Andena Nur Hikmatunnisa, Wilva Ramadayanti, dan Rina Nuryati, "Analisis

- Manajemen Produksi Pertanian Hidroponik Berbasis IoT (Internet of Things) di Wisata Edukasi Arjuna Farm Kecamatan Tamansari Kota Tasikmalaya,” *Mikroba : Jurnal Ilmu Tanaman, Sains Dan Teknologi Pertanian*, vol. 1, no. 3, hlm. 111–125, Des 2024, doi: 10.62951/mikroba.v1i3.164.
- [5] Muhammad Hurairah, Ardian Eza Pratama, dan Eliza, “Otomasi Sistem Hidroponik Berbasis Mikrokontroler ESP32,” *Jurnal Surya Energy*, vol. 9, no. 1, hlm. 1–7, Sep 2024, doi: 10.32502/jse.v9i1.172.
- [6] Saputra, “KARAKTERISASI SENSOR TDS SEN-0244 DAN SENSOR PH-4502C DALAM IMPLEMENTASINYA PADA PENANAMAN HIDROPONIK,” 2024. doi: 10.21009/03.1201.FA22.
- [7] R. Nandika dan E. Amrina, “SISTEM HIDROPONIK BERBASIS INTERNET of THINGS (IoT),” *SIGMA TEKNIKA*, vol. 4, no. 1, hlm. 1–8, Jun 2021, doi: 10.33373/sigmateknika.v4i1.3253.
- [8] M. W. Hamdani, “Perancangan dan Implementasi Metode Kontrol Fuzzy Logic Mamdani pada Sistem Kontrol TDS dan pH Hidroponik,” *JTT (Jurnal Teknologi Terpadu)*, vol. 10, no. 2, hlm. 171–183, Okt 2022, doi: 10.32487/jtt.v10i2.1555.
- [9] T. Sangeetha dan E. Periyathambi, “Automatic nutrient estimator: distributing nutrient solution in hydroponic plants based on plant growth,” *PeerJ Comput Sci*, vol. 10, 2024, doi: 10.7717/peerj-cs.1871.
- [10] S. Jan dkk., “Hydroponics – A Review,” *Int J Curr Microbiol Appl Sci*, vol. 9, no. 8, hlm. 1779–1787, Agu 2020, doi: 10.20546/ijcmas.2020.908.206.
- [11] Ridho Victory Nazara, Putra Hidayat Telaumbanua, Kurnia Selektia E. Harefa, Dorthi Ester Junita Daeli, dan Robert Alberth Sole, “Efektivitas Lama Pemberian Nutrisi terhadap Produktivitas Pakcoy (*Brassica rapa* L.) pada Media Tumbuh Organik Secara Hidroponik Sistem NFT (Nutrient Film Technique),” *AGRIUM: Jurnal Ilmu Pertanian*, Okt 2024, doi: 10.30596/agrium.v27i2.21551.
- [12] K. Sharma, R. Yadav, Shubham, dan S. Kaushal, “Optimizing Hydroponic Crop Production: A Multifaceted Approach to EC, pH and Nutrient Management,” *J Sci Res Rep*, vol. 31, no. 4, hlm. 716–726, Apr 2025, doi: 10.9734/jsrr/2025/v31i42995.
- [13] S. S. Yaakup, N. A. Halim, dan P. Ding, “Effect of Nutrient Solution pH on the Growth and Quality of *Lactuca sativa* Grown in a Static Hydroponic System,” *Pertanika J Trop Agric Sci*, vol. 47, no. 4, hlm. 1175–1189, Nov 2024, doi: 10.47836/pjtas.47.4.08.
- [14] D. Astuti, “KUALITAS AIR IRIGASI DITINJAU DARI PARAMETER DHL, TDS, pH PADA LAHAN SAWAH DESA BULUMANIS KIDUL KECAMATAN MARGOYOSO,” *Jurnal Litbang: Media Informasi Penelitian, Pengembangan dan IPTEK*, vol. 10, no. 1, hlm. 35–42, Des 2018, doi: 10.33658/jl.v10i1.75.
- [15] R. E. Putri, H. M. Harahap, dan I. Putri, “Pengembangan Sistem Kontrol Nutrisi Budidaya Hidroponik Berbasis IoT (Internet of Things) Sawi Samhong (*Brassicasinensis* L.),” *Jurnal Keteknikan Pertanian Tropis dan Biosistem*, vol. 11, no. 2, hlm. 197–206, Agu 2023, doi: 10.21776/ub.jkptb.2023.011.02.09.
- [16] M. Miftah Syahfiqri, E. Kuswara, M. Iqbal Nugraha, dan Z. Saputra, “Rangkaian Pengkondisi Sinyal dan Regresi Linier sebagai Metode Peningkatan Akurasi Pembacaan Sensor TDS pada Sistem Hidroponik,” *Jurnal Inovasi Teknologi Terapan*, vol. 1, no. 1, hlm. 130–138, Feb 2023, doi: 10.33504/jitt.v1i1.83.
- [17] D. Chicco, M. J. Warrens, dan G. Jurman, “The coefficient of determination R-squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in regression analysis evaluation,” *PeerJ Comput Sci*, vol. 7, hlm. e623, Jul 2021, doi: 10.7717/peerj-cs.623.
- [18] S. A. R. L. Román, S. Z. Collazos, dan J. A. C. Chavez, “Model for Reducing Mean Absolute Percentage Error through Smoothing and Time Series Forecasting In a Tourism SME: A Case Study,” *Journal of Machine Intelligence and Data Science*, vol. 5, 2024, doi: 10.11159/jmids.2024.012.