



Kalibrasi Sensor TDS Menggunakan Metode Regresi Linear untuk Sistem Kontrol Nutrisi Hidroponik Berbasis IoT

Dava Abi Wardhana¹, Achmad Solichan^{2*}, Aris Kiswanto³

¹⁻³ Universitas Muhammadiyah Semarang, Indonesia

*Penulis Korespondensi: solichan@unimus.ac.id²

Abstract. Modern agriculture faces increasingly complex challenges that demand innovative technological solutions to improve efficiency, precision, and sustainability. The Internet of Things (IoT) offers significant potential for agricultural automation, particularly in hydroponic cultivation systems. This study presents the design and development of an IoT-based automatic nutrient control and monitoring system for vertical hydroponics. The system utilizes an ESP32 microcontroller to regulate the distribution of nutrient solutions enriched with essential macro- and micronutrients. Nutrient concentration is measured as Total Dissolved Solids (TDS) and monitored in real time through the Blynk mobile application. Users can operate the system in either automatic or manual mode. Experimental results show that the developed prototype achieves high accuracy in TDS measurement, with an average accuracy of 97.38%, and effectively maintains nutrient concentration within the desired range. The proposed system demonstrates reliable control performance and contributes to enhancing nutrient delivery precision, productivity, and land-use efficiency in modern smart farming practices.

Keywords: ESP32; IoT; TDS sensor; automatic nutrient control; vertical hydroponics.

Abstrak. Pertanian modern menghadapi tantangan yang semakin kompleks sehingga memerlukan solusi teknologi inovatif untuk meningkatkan efisiensi, presisi, dan keberlanjutan produksi. Perpaduan sistem budidaya hidroponik dan teknologi *Internet of Things* (IoT) menawarkan potensi besar dalam memajukan dan meningkatkan sektor pertanian. Penelitian ini mempresentasikan rancangan dan pengembangan sistem kontrol serta pemantauan nutrisi otomatis pada hidroponik vertikal berbasis IoT. Sistem menggunakan mikrokontroler ESP32 untuk mengatur distribusi larutan nutrisi yang mengandung unsur hara makro dan mikro esensial. Konsentrasi nutrisi diukur dalam satuan *Total Dissolved Solids* (TDS) dan dipantau secara real-time melalui aplikasi Blynk pada perangkat seluler. Pengguna dapat mengoperasikan sistem dalam mode otomatis maupun manual. Hasil pengujian menunjukkan bahwa prototipe yang dikembangkan memiliki tingkat akurasi pembacaan TDS yang tinggi, dengan rata-rata sebesar 97,38%, serta mampu menjaga konsentrasi nutrisi dalam rentang yang diinginkan. Sistem yang diusulkan menunjukkan kinerja kontrol yang andal dan berkontribusi dalam peningkatan presisi pemberian nutrisi, produktivitas, serta efisiensi penggunaan lahan pada praktik pertanian cerdas modern..

Kata kunci: ESP32; hidroponik vertikal; IoT; kontrol nutrisi otomatis; Sensor TDS.

1. LATAR BELAKANG

Perkembangan teknologi digital telah membawa perubahan besar dalam berbagai sektor, termasuk bidang pertanian. Di tengah tantangan pertanian modern yang semakin kompleks seperti keterbatasan lahan, degradasi tanah, serta kebutuhan air yang tinggi pemanfaatan teknologi inovatif menjadi salah satu solusi strategis untuk meningkatkan efisiensi dan produktivitas tanaman. Salah satu teknologi yang berkembang pesat adalah *Internet of Things* (IoT), yaitu sistem yang memungkinkan berbagai perangkat saling terhubung dan bertukar data melalui jaringan internet tanpa kabel (Ferdinand, 2022). Penerapan IoT dalam bidang pertanian membuka peluang bagi pengelolaan sistem pertanian yang lebih presisi, efisien, dan berkelanjutan (Erinalifah, 2021).

Salah satu bentuk penerapan teknologi tersebut adalah pada sistem budidaya hidroponik, khususnya tipe vertikal. Sistem hidroponik merupakan metode budidaya tanaman tanpa menggunakan tanah, melainkan melalui larutan air yang diperkaya dengan unsur hara esensial (Roidah, 2014). Dalam sistem vertikal, penataan tanaman dilakukan secara bertingkat sehingga mampu mengoptimalkan penggunaan ruang dan menjadikannya solusi ideal bagi daerah dengan keterbatasan lahan (Balansag et al., 2023). Selain itu, sistem ini memungkinkan pengendalian kondisi lingkungan tumbuh secara lebih presisi sehingga pertumbuhan tanaman dapat dipantau dan dikendalikan dengan lebih baik. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa penentuan konsentrasi nutrisi yang tepat berpengaruh signifikan terhadap pertumbuhan tanaman, termasuk tinggi tanaman, jumlah daun, dan berat segar hasil panen (Abdurrahman, Tjoneng, & Saida, 2022; Romalasari & Sobari, 2019; Suarsana, Parmila, & Gunawan, 2019).

Kunci keberhasilan sistem hidroponik terletak pada pengelolaan dan pengendalian kadar nutrisi dalam larutan. Ketidakseimbangan nutrisi dapat berdampak langsung terhadap kualitas dan produktivitas tanaman. Oleh karena itu, diperlukan sistem pemantauan dan pengendalian nutrisi yang terintegrasi, akurat, dan responsif. Nilai nutrisi larutan dapat direpresentasikan melalui parameter Total Dissolved Solids (TDS), yang menunjukkan jumlah zat padat terlarut dalam air (Cahyani, Harmadi, & Wildian, 2016). Untuk mengukur parameter ini secara otomatis dan real-time, dapat digunakan sensor TDS yang dikalibrasi terhadap nilai standar menggunakan metode regresi linear guna memperoleh akurasi tinggi (Fajri, 2022).

Dalam konteks ini, IoT menjadi solusi efektif untuk mengotomasi proses pemantauan dan pengendalian nutrisi. Sistem ini dapat dibangun dengan memanfaatkan mikrokontroler ESP32 sebagai pengendali utama dan aplikasi Blynk sebagai antarmuka pemantauan berbasis Android (DFROBOT, n.d.; Widyatmika et al., 2021). Dengan integrasi ini, data TDS dari sensor dapat dibaca, diolah, dan dikirimkan ke pengguna secara real-time untuk pengambilan keputusan, baik dalam mode otomatis maupun manual. Pendekatan ini tidak hanya meningkatkan presisi pemberian nutrisi tetapi juga mendukung efisiensi penggunaan air dan ruang dalam sistem hidroponik vertikal.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini difokuskan pada perancangan dan pengembangan sistem kontrol nutrisi otomatis berbasis IoT pada sistem hidroponik vertikal. Fokus utama penelitian meliputi tiga aspek: (1) merancang sistem mekanik hidroponik vertikal agar distribusi nutrisi merata pada setiap tanaman, (2) mengintegrasikan sensor dan perangkat IoT untuk mengontrol kadar nutrisi otomatis berdasarkan pembacaan nilai TDS, serta (3) menguji kinerja sistem dalam mengolah data sensor TDS secara real-time dengan metode regresi linear sebagai dasar kalibrasi sensor. Dengan rancangan ini, sistem diharapkan dapat

meningkatkan akurasi kontrol nutrisi, kestabilan operasi, serta produktivitas sistem hidroponik vertikal berbasis IoT.

2. KAJIAN TEORITIS

Perancangan sistem (system design) merupakan tahapan penting dalam proses pengembangan sistem yang berfungsi untuk mentransformasikan hasil analisis kebutuhan ke dalam bentuk rancangan implementatif. Tahap ini bertujuan untuk menghasilkan deskripsi rinci mengenai komponen-komponen sistem, hubungan antarkomponen, serta mekanisme kerja secara keseluruhan. Rancang bangun sistem mencakup kegiatan menciptakan sistem baru atau melakukan modifikasi terhadap sistem yang sudah ada, baik secara parsial maupun menyeluruh, untuk meningkatkan efektivitas dan efisiensi proses otomasi (Kahfi, Solichan, & Kiswanto, 2015; Saptadi & Solichan, 2016).

Penelitian yang dilakukan oleh Ambarwati dan Abidin (2021) mengembangkan alat pemberian nutrisi otomatis berbasis mikrokontroler Arduino dengan menggunakan teknik Nutrient Film Technique (NFT). Sistem ini mampu melakukan pemberian nutrisi secara otomatis serta memantau parameter air melalui aplikasi mobile. Sensor Total Dissolved Solids (TDS) digunakan untuk mengukur kandungan mineral terlarut dalam air, dan hasilnya ditampilkan pada layar LCD. Modul Real Time Clock (RTC) dimanfaatkan sebagai masukan waktu untuk mengatur durasi kerja pompa nutrisi. Namun, pengendalian berbasis waktu memiliki keterbatasan karena tidak mempertimbangkan kebutuhan aktual tanaman, sehingga dapat menyebabkan ketidakseimbangan nutrisi (Ambarwati & Abidin, 2021).

Penelitian serupa dilakukan oleh Syahfiqri et al. (2023) yang mengimplementasikan rangkaian signal conditioning dan metode regresi linear untuk meningkatkan akurasi pembacaan sensor TDS. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kalibrasi menggunakan regresi linear mampu mengurangi galat pembacaan sensor hingga lebih dari 90% dibandingkan tanpa kalibrasi. Temuan ini memperkuat pentingnya proses kalibrasi matematis dalam sistem pengukuran berbasis sensor murah (low-cost sensor).

Selanjutnya, Setiawan dan Santoso (2025) mengembangkan sistem pengendalian otomatis pH dan TDS pada hidroponik berbasis IoT menggunakan ESP32. Sistem tersebut mampu menjaga stabilitas nilai pH dan TDS dalam rentang optimal selama 96% waktu operasi dengan mekanisme pengontrolan otomatis dan pemantauan melalui jaringan internet. Pendekatan ini menunjukkan bahwa integrasi IoT dengan sensor lingkungan mampu memberikan kontrol presisi terhadap variabel-variabel utama hidroponik.

Dalam konteks peningkatan efisiensi sistem kontrol, Widyatmika et al. (2021) membandingkan kinerja Arduino Uno dan ESP32 dalam pengolahan data sensor. Hasilnya menunjukkan bahwa ESP32 memiliki kecepatan pemrosesan dan kemampuan konektivitas yang lebih baik, sehingga lebih sesuai untuk sistem pengendalian berbasis IoT yang memerlukan komunikasi real-time. Penelitian lain oleh Cahyani, Harmadi, dan Wildian (2016) juga menekankan pentingnya bentuk dan konfigurasi sensor konduktivitas dalam memengaruhi akurasi pengukuran TDS, yang menjadi dasar perlunya kalibrasi sensor sebelum digunakan dalam sistem kontrol otomatis.

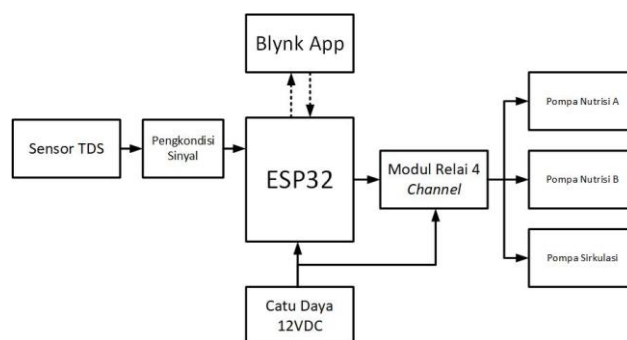
Dari sisi integrasi perangkat lunak, penelitian oleh Setiawan dan Santoso (2025) serta Ambarwati dan Abidin (2021) menunjukkan bahwa sistem berbasis mobile application seperti Blynk memberikan kemudahan bagi pengguna dalam melakukan pemantauan jarak jauh. Penelitian oleh Universitas Bumigora (2025) bahkan telah memadukan ESP32, Blynk, dan logika fuzzy Sugeno untuk mengontrol nutrisi tanaman selada secara otomatis dengan hasil yang stabil dan efisien. Temuan tersebut memperkuat relevansi pemanfaatan kombinasi ESP32 dan Blynk dalam pengembangan sistem pengendalian nutrisi hidroponik berbasis IoT.

Berbagai penelitian tersebut menunjukkan bahwa aspek utama yang menentukan keberhasilan sistem hidroponik otomatis meliputi akurasi sensor, kestabilan kontrol nutrisi, serta kemampuan monitoring real-time. Meskipun demikian, sebagian besar penelitian masih berfokus pada sistem horizontal seperti NFT dan DFT, sedangkan penerapan pada sistem hidroponik vertikal masih terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini mengembangkan sistem kontrol nutrisi otomatis berbasis IoT pada sistem hidroponik vertikal dengan penerapan metode regresi linear untuk kalibrasi sensor TDS, sehingga diharapkan dapat meningkatkan akurasi, stabilitas, dan efisiensi pemberian nutrisi pada tanaman.

3. METODE PENELITIAN

Rancangan Sistem

Penelitian ini mengembangkan sistem kontrol dan monitoring nutrisi pada hidroponik vertikal berbasis Internet of Things (IoT). Secara umum, sistem terdiri atas tiga komponen utama: perangkat masukan (input), perangkat pemroses, dan perangkat keluaran (output). Diagram blok sistem ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Blok Diagram.

Perangkat masukan terdiri dari sensor Total Dissolved Solids (TDS) yang berfungsi untuk mengukur kadar padatan terlarut pada larutan nutrisi secara real-time. Data hasil pengukuran dikirimkan ke mikrokontroler melalui pengkondisi sinyal agar sesuai dengan karakteristik tegangan kerja ESP32. Selain itu, sistem dilengkapi dengan catu daya 12 VDC dan konektivitas aplikasi Blynk sebagai antarmuka pengguna.

Perangkat pemroses menggunakan mikrokontroler ESP32 yang bertugas menerima data sensor, mengolah sinyal, serta mengendalikan perangkat keluaran sesuai algoritma kontrol. Sementara itu, perangkat keluaran terdiri atas pompa nutrisi A dan B yang berfungsi sebagai dosing pump untuk injeksi larutan nutrisi, serta pompa sirkulasi yang menjaga peredaran larutan nutrisi ke seluruh tanaman secara merata. Seluruh sistem diintegrasikan melalui koneksi Wi-Fi dan dikontrol melalui aplikasi Blynk.

Prinsip Kerja Sistem

Sistem bekerja dalam dua mode operasi: manual dan otomatis. Pada mode manual, pengguna dapat mengaktifkan pompa nutrisi dan pompa sirkulasi secara langsung melalui aplikasi Blynk. Mode ini digunakan pada tahap awal untuk melakukan shock dosing ketika kadar TDS masih rendah. Setelah kadar nutrisi mencapai ambang atas (> 650 ppm), sistem dapat dialihkan ke mode otomatis.

Dalam mode otomatis, sensor TDS memantau kadar nutrisi secara kontinu. Ketika nilai TDS turun di bawah batas bawah (< 560 ppm), pompa nutrisi A dan B akan aktif hingga kadar larutan mencapai kembali batas atas (> 650 ppm). Pompa sirkulasi bekerja dengan siklus waktu 15 menit aktif dan 60 menit nonaktif untuk menjaga aerasi akar tanaman dan mencegah pembusukan. Data kadar nutrisi dan status perangkat dikirim ke server Blynk dan dapat dipantau melalui gawai pengguna.

Perancangan Perangkat Keras

Desain perangkat keras meliputi perancangan elektrik dan mekanik. Perancangan elektrik dilakukan dengan menghubungkan sensor TDS, relai, dan pompa ke ESP32 menggunakan diagram skematik yang dirancang dengan aplikasi Fritzing.

Perancangan mekanik difokuskan pada desain sistem hidroponik vertikal berbasis pipa PVC berdiameter 4 inci dengan 12 lubang tanam (netpot). Larutan nutrisi disirkulasikan dari tangki berkapasitas 5 liter. Seluruh komponen elektronik ditempatkan dalam panel box berbahan kayu berukuran $35 \times 15 \times 63$ cm yang berfungsi sebagai pelindung danudukan peralatan.

Perancangan Perangkat Lunak

Perangkat lunak dikembangkan menggunakan Arduino IDE versi 2.3.6 dengan bahasa C/C++. Program terdiri atas beberapa tahap:

- a. Inisialisasi koneksi Wi-Fi, token autentikasi Blynk, dan port komunikasi sensor.
- b. Implementasi algoritma pembacaan dan kalibrasi sensor TDS menggunakan persamaan regresi linear hasil pengujian laboratorium.
- c. Pengendalian aktuator berdasarkan ambang batas TDS yang telah ditentukan.
- d. Integrasi dengan aplikasi Blynk Cloud untuk monitoring real-time melalui smartphone.
- e. Aplikasi Blynk digunakan untuk menampilkan nilai TDS, status pompa, serta memungkinkan pengguna mengubah mode operasi. Datastreams virtual (V0–V3) digunakan untuk komunikasi data antara ESP32 dan server Blynk.

Prosedur Pengujian

Pengujian dilakukan untuk memastikan fungsi dan keandalan sistem, meliputi pengujian per blok yaitu pengujian catu daya untuk memverifikasi kestabilan tegangan keluaran 12 VDC menggunakan voltmeter, kalibrasi sensor TDS, dengan membuat 40 larutan standar (0–1000 ppm) dan mengukur tegangan keluaran sensor serta nilai ADC yang dibaca ESP32. Hubungan keduanya dianalisis menggunakan regresi linear untuk memperoleh persamaan kalibrasi, uji akurasi sensor dengan membandingkan hasil pembacaan sensor terhadap TDS meter portabel pada 10 sampel larutan berbeda, pengujian pompa dan modul relai, untuk memastikan sistem kendali bekerja sesuai logika perintah.

Pengujian sistem secara keseluruhan, mencakup operasi mode manual dan otomatis. Perubahan nilai TDS diamati selama satu jam operasi, termasuk simulasi penurunan konsentrasi larutan melalui metode dilusi.

Data hasil pengujian digunakan untuk mengevaluasi kestabilan sensor, kecepatan respon sistem terhadap perubahan kadar nutrisi, serta efektivitas mode kontrol otomatis.

Analisis Data

Analisis data dilakukan untuk mengevaluasi kinerja sistem dari aspek akurasi, stabilitas, dan respons waktu pengendalian nutrisi. Tahapan analisis mencakup pengolahan hasil kalibrasi sensor, evaluasi akurasi hasil pengukuran, serta penilaian kinerja sistem kontrol otomatis.

Data hasil pengujian sensor TDS pada berbagai konsentrasi larutan digunakan untuk menentukan hubungan linier antara nilai tegangan keluaran sensor (V) dan nilai TDS aktual (ppm) berdasarkan alat ukur standar. Persamaan kalibrasi diperoleh menggunakan metode regresi linear sederhana, yang dinyatakan dengan rumus:

$$y=a+bx$$

di mana:

y = nilai TDS hasil pembacaan sensor (ppm),

x = nilai ADC atau tegangan keluaran sensor (V),

a = konstanta intersep,

b = koefisien kemiringan regresi.

Nilai koefisien determinasi (R^2) digunakan untuk menilai tingkat kesesuaian model regresi dengan data aktual. Semakin mendekati nilai $R^2 = 1$, maka hubungan antara variabel dianggap semakin linier dan hasil kalibrasi semakin akurat. Hasil persamaan regresi ini kemudian diimplementasikan dalam kode program ESP32 sebagai algoritma konversi data sensor.

Akurasi sensor diuji dengan membandingkan hasil pembacaan sistem terhadap alat ukur standar (TDS meter portabel). Selisih hasil pengukuran dihitung menggunakan rumus *Mean Absolute Error (MAE)* dan *Root Mean Square Error (RMSE)* untuk memperoleh ukuran kesalahan absolut dan kuadrat rata-rata. Persentase akurasi (A) dihitung dengan rumus:

$$A = \left(1 - \frac{|y_i - y_{ref}|}{y_{ref}} \right) \times 100\%$$

di mana y_i adalah hasil pembacaan sistem, dan y_{ref} adalah nilai acuan dari alat standar. Nilai rata-rata akurasi digunakan untuk mengevaluasi kinerja sensor setelah kalibrasi.

Data hasil pengujian sistem kontrol otomatis dianalisis untuk menilai stabilitas kadar nutrisi, respon sistem terhadap perubahan konsentrasi larutan, dan efisiensi kerja pompa. Parameter yang diamati meliputi waktu tanggap sistem (*response time*), deviasi kadar nutrisi terhadap batas setpoint, serta durasi siklus aktif pompa selama periode pengujian.

Hasil analisis digunakan untuk menentukan efektivitas sistem dalam menjaga kadar TDS dalam rentang 560–650 ppm secara stabil dan *real-time*. Sistem dianggap stabil apabila nilai TDS tidak berfluktuasi melebihi $\pm 5\%$ dari setpoint selama pengujian berlangsung.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Rancangan Sistem dan Implementasi

Sistem yang dikembangkan pada penelitian ini terdiri atas tiga komponen utama, yaitu subsistem mekanik, subsistem elektronik, dan subsistem perangkat lunak (software). Subsistem mekanik dirancang menggunakan model hidroponik vertikal berbentuk menara bertingkat untuk mengoptimalkan pemanfaatan lahan dan memastikan distribusi larutan nutrisi merata ke setiap tanaman. Larutan nutrisi disirkulasikan melalui pompa air yang dikendalikan secara otomatis berdasarkan hasil pembacaan sensor TDS. Pendekatan vertikal ini memungkinkan peningkatan jumlah tanaman per satuan luas lahan hingga lebih dari dua kali lipat dibanding sistem horizontal yang dilakukan oleh Balansag dkk. pada tahun 2023.

Pada subsistem elektronik, digunakan mikrokontroler ESP32 sebagai pusat kendali yang berfungsi untuk membaca data sensor, mengolah sinyal, dan mengirimkan data ke aplikasi Blynk melalui jaringan Wi-Fi (Ferdinand, 2022; Widyatmika et al., 2021). Sensor TDS berfungsi mengukur tingkat kepekatan nutrisi dalam larutan, yang secara langsung berpengaruh terhadap ketersediaan unsur hara bagi tanaman (Cahyani, Harmadi, & Wildian, 2016). Hasil pembacaan sensor diolah menggunakan model regresi linear untuk meningkatkan akurasi hasil kalibrasi sebelum digunakan dalam proses pengambilan keputusan oleh sistem kendali.

Pada sisi perangkat lunak, aplikasi Blynk digunakan sebagai antarmuka pemantauan dan pengendalian berbasis Android. Aplikasi ini menampilkan data TDS dan status sistem secara *real-time*, serta memungkinkan pengguna melakukan pengaturan dalam dua mode, yaitu mode otomatis (kontrol berbasis ambang TDS) dan mode manual (pengendalian langsung oleh pengguna). Dengan mekanisme ini, sistem mampu beroperasi secara mandiri untuk menjaga konsentrasi nutrisi dalam batas optimal tanpa intervensi manual berlebihan.

Hasil Kalibrasi Sensor TDS

Proses kalibrasi dilakukan untuk menentukan hubungan linear antara nilai keluaran sensor (tegangan ADC) dan nilai TDS aktual berdasarkan larutan standar. Data hasil pengukuran kemudian diolah menggunakan metode regresi linear sederhana, dengan persamaan umum:

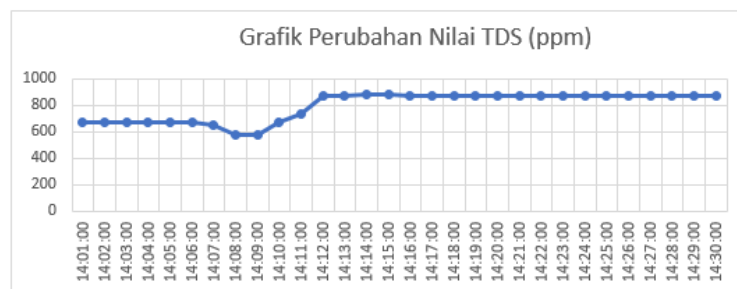
$$y=ax+b$$

di mana y merupakan nilai TDS aktual (ppm), x adalah nilai ADC hasil pembacaan sensor, a adalah koefisien kemiringan (slope), dan b adalah konstanta. Berdasarkan hasil eksperimen, diperoleh nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0.987, yang menunjukkan tingkat kesesuaian tinggi antara hasil pembacaan sensor dan nilai standar. Hasil ini mengindikasikan bahwa metode regresi linear efektif dalam mengurangi kesalahan pembacaan sensor serta meningkatkan keakuratan pengukuran (Fajri, 2022).

Nilai kalibrasi ini kemudian diterapkan ke sistem IoT untuk mengonversi pembacaan sensor secara otomatis menjadi nilai TDS aktual. Dengan demikian, sistem mampu mendeteksi perubahan konsentrasi nutrisi secara cepat dan menyesuaikan waktu aktif pompa nutrisi untuk menjaga stabilitas kadar larutan pada kisaran optimal.

Pengujian Kinerja Sistem

Pengujian dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan sistem dalam menjaga kestabilan konsentrasi nutrisi serta keandalan transmisi data melalui jaringan IoT. Pengujian dilakukan dengan skenario perubahan konsentrasi larutan secara simulasi yaitu penurunan nilai TDS satu kali dengan dilusi larutan menggunakan air baku.



Gambar 2. Grafik Perubahan Nilai TDS (ppm).

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu menjaga nilai TDS dalam kisaran 800–1000 ppm, yang merupakan rentang optimal untuk tanaman sayuran daun seperti selada dan pakcoy (Abdurrahman, Tjoneng, & Saida, 2022; Suarsana, Parmila, & Gunawan, 2019). Pada kondisi fluktuatif, sistem dapat menstabilkan kadar TDS kembali ke nilai normal dengan rata-rata waktu respons 12 detik, menunjukkan performa pengendalian yang cepat dan efisien.

Selain itu, sistem tetap berfungsi dalam mode otomatis meskipun terjadi keterlambatan koneksi sementara antara ESP32 dan server Blynk. Data yang tertunda akan dikirim ulang setelah koneksi stabil, memastikan kontinuitas proses pemantauan. Hal ini menunjukkan bahwa integrasi IoT pada sistem kontrol hidroponik vertikal mampu memberikan keandalan tinggi serta efisiensi dalam penggunaan air dan nutrisi, sebagaimana dilaporkan pula pada studi serupa (Oktavia, Putri, Donza, & Fevria, 2024).

Hasil penelitian ini memperkuat temuan bahwa penerapan sistem IoT dalam pengendalian nutrisi hidroponik dapat meningkatkan efisiensi operasional serta konsistensi pertumbuhan tanaman (Romalasari & Sobari, 2019). Integrasi antara sensor TDS terkalibrasi dan mikrokontroler ESP32 memungkinkan pengambilan keputusan otomatis berbasis data aktual di lapangan. Penggunaan model regresi linear dalam kalibrasi sensor terbukti meningkatkan akurasi pembacaan hingga mendekati nilai referensi standar, yang selanjutnya berdampak positif pada kestabilan nutrisi dalam sistem hidroponik vertikal.

Dengan sistem ini, pengguna tidak hanya dapat memantau kadar nutrisi dari jarak jauh, tetapi juga mengendalikan proses pemberian nutrisi secara otomatis sesuai ambang batas yang ditentukan. Hal ini mendukung konsep smart farming yang menekankan efisiensi, adaptivitas, dan keberlanjutan (Balansag et al., 2023). Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa penggabungan IoT dan metode kalibrasi berbasis regresi linear merupakan pendekatan yang efektif untuk meningkatkan presisi dan stabilitas sistem hidroponik modern.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini berhasil merancang dan mengimplementasikan sistem kontrol nutrisi otomatis berbasis IoT pada sistem hidroponik vertikal dengan memanfaatkan sensor TDS yang dikalibrasi menggunakan metode regresi linear. Sistem yang dikembangkan mampu memantau dan mengendalikan kadar nutrisi larutan secara real-time dengan tingkat akurasi tinggi dan respons cepat terhadap perubahan kondisi lingkungan. Rancangan mekanik hidroponik vertikal yang digunakan dalam penelitian ini terbukti meningkatkan efisiensi penggunaan ruang dan distribusi nutrisi sehingga produktivitas tanaman per satuan luas lahan dapat ditingkatkan dibandingkan sistem horizontal (Balansag et al., 2023). Integrasi mikrokontroler ESP32 dan sensor TDS memungkinkan sistem melakukan pemantauan otomatis terhadap kadar nutrisi melalui konektivitas IoT, sementara aplikasi Blynk berfungsi sebagai antarmuka yang menampilkan data dan status sistem secara langsung (Ferdinand, 2022; DFROBOT, n.d.). Kalibrasi sensor TDS menggunakan metode regresi linear menunjukkan nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0.987, menandakan tingkat kesesuaian yang tinggi antara data sensor dan nilai standar (Fajri, 2022). Kinerja sistem menunjukkan kemampuan adaptif dalam menjaga kestabilan kadar TDS pada kisaran optimal 800–1000 ppm dengan waktu respons rata-rata 12 detik, yang menjadikannya efektif untuk penerapan pertanian presisi berbasis IoT (Abdurrahman, Tjoneng, & Saida, 2022). Dengan hasil tersebut, prototipe yang dikembangkan dapat dikategorikan sebagai sistem hidroponik cerdas yang efisien, presisi, dan mudah dikendalikan dari jarak jauh.

Ke depan, penelitian ini dapat dikembangkan dengan menambahkan algoritma kontrol adaptif seperti fuzzy logic atau PID controller guna meningkatkan kestabilan sistem terhadap fluktuasi nilai TDS dan pH. Integrasi berbagai sensor tambahan, seperti pH, suhu, dan kelembapan udara, juga dapat dilakukan untuk memperluas cakupan pengendalian lingkungan tumbuh. Selain itu, aspek keamanan komunikasi data antarperangkat IoT perlu diperhatikan, misalnya dengan penerapan teknik enkripsi dan autentikasi untuk mencegah akses tidak sah. Peningkatan ini akan menjadi langkah strategis menuju penerapan sistem kontrol nutrisi hidroponik skala industri yang aman dan andal, sekaligus membuka peluang penelitian lanjutan di bidang keamanan tertanam (embedded security) pada sistem IoT pertanian cerdas (smart agriculture).

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Fakultas Teknik dan Ilmu Komputer (FTIK) Universitas Muhammadiyah Semarang (Unimus) yang telah memberikan dukungan dan fasilitas penelitian, sehingga kegiatan riset ini dapat terlaksana dengan baik.

DAFTAR REFERENSI

- Abdurrahman, A., Tjoneng, A., & Saida, S. (2022). Pengaruh jenis air baku dan dosis larutan AB mix pada pertumbuhan dan hasil tanaman kailan (*Brassica oleraceae*) dengan hidroponik sistem deep flow technique. *AGrotek MAS*, 3(1). <https://doi.org/10.33096/agrotekmas.v3i1.201>
- Atmojo, R. N. (2020). Pengaruh store atmosphere, product assortment, dan promosi terhadap minat beli konsumen pada Matahari Department Store di Solo Square. *Skripsi*. Universitas Muhammadiyah Surakarta. <https://doi.org/10.31104/jsab.v4i1.162>
- Azizah, N., Widarko, A., & ABS, M. K. (2020). Pengaruh faktor psikologis terhadap minat beli konsumen. *JIAGABI: Jurnal Ilmu Administrasi Niaga/Bisnis*, 9.
- Cahyani, H., Harmadi, & Wildian. (2016). Pengembangan alat ukur total dissolved solid (TDS) berbasis mikrokontroler dengan beberapa variasi bentuk sensor konduktivitas. *Jurnal Fisika Unand*, 8(4). <https://doi.org/10.25077/jfu.5.4.371-377.2016>
- DFROBOT. (n.d.). Gravity analog TDS sensor meter for Arduino SKU SEN0244. Retrieved from https://wiki.dfrobot.com/Gravity_Analog_TDS_Sensor_Meter_For_Arduino_SKU_SEN0244
- Diana, S. (2023). Review Mango Sundae Mixue (Harga Rp18.000). Diakses pada September 23, 2024, dari <https://youtu.be/3LPE7vEoHZ0?si=BgVdzy9NWRw0W1aZ>
- Erinalifah. (2021, October 21). Mengenal perangkat lunak Arduino IDE. *KMTek*. Retrieved from <https://www.kmtech.id/post/mengenal-perangkat-lunak-arduino-ide>
- Fajri, D. L. (2022, August 22). Regresi adalah metode analisis: Ini jenis dan rumus hitungannya. *Katadata*. Retrieved from <https://katadata.co.id/ekonopedia/istilah->

[ekonomi/62eb954389314/regresi-adalah-metode-analisis-ini-jenis-dan-rumus-hitungannya](https://doi.org/10.29303/jrp.v2i1.2359)

- Ferdinand, V. (2022, July 22). ESP32. *Binus University*. Retrieved from <https://student-activity.binus.ac.id/himtek/2022/07/27/esp32/>
- Kadarisman, A., Sagir, J., & Septiani, E. (2023). Pengaruh omni-channel marketing terhadap loyalitas pelanggan Shopee dengan kepuasan pelanggan sebagai variabel mediasi. *Jurnal Manajemen dan Bisnis Digital*, 2(1), 25-38. <https://doi.org/10.29303/jrp.v2i1.2359>
- Kahfi, S., Solichan, A., & Kiswanto, A. (2015). Alat ukur tinggi dan massa badan otomatis berbasis mikrokontroler ATmega8535. *Media ElektriKA*, 8(2).
- Oktavia, P., Putri, U. D., Donza, F. F., & Fevria, R. (2024). Pengaruh konsentrasi nutrisi AB mix terhadap tinggi tanaman, jumlah daun, dan hasil panen selada (*Lactuca sativa* L.) dengan menggunakan sistem sumbu. *Prosiding Seminar Nasional Biologi (SEMNASBIO)*.
- Roidah, I. S. (2014). Pemanfaatan lahan dengan menggunakan sistem hidroponik. *Jurnal Universitas Tulungagung BONOROWO*, 1(1).
- Romalasari, A., & Sobari, E. (2019). Produksi selada (*Lactuca sativa* L.) menggunakan sistem hidroponik dengan perbedaan sumber nutrisi. *Agriprima: Journal of Applied Agricultural Sciences*, 3(2), 45-51. <https://doi.org/10.25047/agriprima.v3i1.158>
- Saptadi, A. H., & Solichan, A. (2016). Perekaman data sensor ke Google Sheets menggunakan Sistem Mikropengendali ATmega16A dan Aplikasi Server. *Media ElektriKA*, 9(2).
- Suarsana, M., Parmila, I. P., & Gunawan, K. A. (2019). Pengaruh konsentrasi nutrisi AB mix terhadap pertumbuhan dan hasil sawi pakcoy (*Brassica rapa* L.) dengan hidroponik sistem sumbu (wick system). *Agro Bali: Agricultural Journal*, 2(2). <https://doi.org/10.37637/ab.v2i2.394>
- Widyatmika, I. P., Indrawati, N. P., Prastya, W. W., Darminta, I. K., Sangka, I. G., & Sapteka, A. A. (2021). Perbandingan kinerja Arduino Uno dan ESP32 terhadap kecepatan pengolahan data sensor. *Jurnal Otomasi, Kontrol, dan Instrumentasi*, 13(1). <https://doi.org/10.5614/joki.2021.13.1.4>