

Sistem Monitoring dan Kontrol Larutan Nutrisi Hidroponik NFT Berbasis IoT Menggunakan EMA dengan Analisis Interferensi Sensor

Rafif Zetta Rajendra Pragiwoko^{1*}, Rully Pramudita²
^{1,2}Teknik Informatika, Universitas Bina Insani, Indonesia
^{1*}rafif.zrp06@gmail.com, ²rullypramudita@binainsani.ac.id

Abstrak: Sistem hidroponik metode *Nutrient Film Technique* (NFT) memerlukan pengelolaan larutan nutrisi yang stabil, terutama pada parameter pH dan konsentrasi nutrisi yang mempengaruhi penyerapan unsur hara tanaman. Berdasarkan hasil observasi pada *greenhouse* Mega Regency, proses monitoring pH dan nutrisi masih dilakukan secara manual sehingga perubahan kondisi larutan tidak dapat dipantau secara *real-time* dan berkelanjutan. Penelitian ini bertujuan merancang dan mengimplementasikan sistem monitoring dan kontrol larutan nutrisi berbasis *Internet of Things* (IoT) pada hidroponik NFT. Metode pengembangan sistem yang digunakan adalah *Rapid Application Development* (RAD). Sistem dibangun menggunakan mikrokontroler ESP32 yang terintegrasi dengan sensor pH, sensor TDS, sensor suhu DS18B20, sensor ultrasonik, serta aktuator berupa pompa pH *up*, pH *down*, dan nutrisi AB *Mix*. Data sensor diproses menggunakan metode *Exponential Moving Average* (EMA) untuk mengurangi *noise* pembacaan sensor, sedangkan proses kontrol menggunakan metode *hysteresis*. Data *monitoring* dikirimkan ke platform *ThingsBoard* dan ditampilkan melalui *dashboard* berbasis *Cloud*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem mampu melakukan monitoring pH, nutrisi, suhu, dan tinggi air secara berkelanjutan dengan akurasi sensor pH mencapai 95,84%, sensor TDS 98,66%, dan sensor ultrasonik 97,14%. Metode EMA terbukti efektif meredam fluktuasi pembacaan sensor hingga 0,74 unit pH, sedangkan metode *hysteresis* menjaga parameter tetap berada pada rentang yang ditentukan melalui pengaktifan pompa secara otomatis. Pada tahap integrasi ditemukan interferensi elektrokimia antara probe sensor pH dan TDS dalam satu tandon. Berbagai solusi dicoba secara bertahap mulai dari stabilisasi tegangan menggunakan kapasitor, mekanisme *switching power* via transistor, hingga relokasi probe ke titik aliran pipa yang berbeda sebagai solusi akhir yang lebih efektif. Sistem yang dikembangkan mampu mendukung pengelolaan hidroponik secara lebih efektif dan otomatis.

Kata Kunci: *Internet of Things*; Hidroponik NFT; *Monitoring* pH; ESP32; Kontrol *Hysteresis*.

Abstract: The Nutrient Film Technique (NFT) hydroponic system requires stable nutrient solution management, particularly pH and nutrient concentration parameters that affect plant nutrient absorption. Based on observations conducted at the Mega Regency greenhouse, pH and nutrient monitoring are still performed manually, causing changes in nutrient conditions

to not be monitored continuously in real-time. This study aims to design and implement an Internet of Things (IoT)-based monitoring and control system for nutrient solutions in NFT hydroponics. The development method used is Rapid Application Development (RAD). The system was developed using an ESP32 microcontroller integrated with pH, TDS, DS18B20 temperature, and ultrasonic sensors, as well as actuators in the form of pH up, pH down, and AB Mix nutrient pumps. Sensor data were processed using the Exponential Moving Average (EMA) method to reduce reading noise, while the control process applied the hysteresis method. Monitoring data were sent to the ThingsBoard platform and displayed through a Cloud-based dashboard. The results showed that the system was capable of continuously monitoring pH, nutrient concentration, temperature, and water level, with sensor accuracy reaching 95.84% for pH, 98.66% for TDS, and 97.14% for ultrasonic sensors. The EMA method effectively reduced sensor reading fluctuations by up to 0.74 pH units, while the hysteresis method maintained parameters within the specified range through automatic pump activation. During integration, electrochemical interference was found between pH and TDS sensor probes in the same reservoir. Various solutions were attempted progressively, from voltage stabilization using capacitors, switching power mechanism via transistors, to probe relocation to different pipe flow points as the more effective final solution. The developed system supports hydroponic management more effectively and automatically.

Keywords: *Internet of Things, NFT Hydroponics, pH Monitoring, ESP32, Hysteresis Control.*

1. PENDAHULUAN

Sistem hidroponik merupakan metode budidaya tanaman tanpa menggunakan tanah yang memanfaatkan larutan nutrisi sebagai media utama pertumbuhan tanaman. Metode ini semakin banyak diterapkan karena mampu meningkatkan efisiensi penggunaan air dan nutrisi serta memungkinkan budidaya dilakukan pada lahan yang terbatas. Salah satu metode hidroponik yang banyak digunakan adalah *Nutrient Film Technique (NFT)*, yaitu sistem budidaya yang mengalirkan larutan nutrisi secara kontinu dalam lapisan tipis pada saluran tanam sehingga akar tanaman memperoleh suplai air, oksigen, dan unsur hara secara optimal. Metode NFT dikenal memiliki efisiensi penggunaan nutrisi yang tinggi dan mampu mendukung pertumbuhan tanaman secara berkelanjutan [1]. Pada sistem hidroponik NFT, kualitas larutan nutrisi menjadi faktor yang sangat menentukan keberhasilan pertumbuhan tanaman. Salah satu parameter yang paling berpengaruh adalah derajat keasaman (pH) larutan nutrisi karena berhubungan langsung dengan kemampuan akar tanaman dalam menyerap unsur hara. Nilai pH yang berada di luar rentang optimal dapat menyebabkan beberapa unsur hara sulit diserap sehingga menghambat pertumbuhan tanaman dan menurunkan hasil panen. Rentang pH yang direkomendasikan untuk sebagian besar tanaman hidroponik berada pada kisaran 5,5 hingga 6,5 [2]. Selain pH, konsentrasi nutrisi dan ketersediaan air juga perlu dipantau untuk menjaga kestabilan lingkungan tumbuh tanaman. Berdasarkan hasil observasi yang dilakukan pada *Greenhouse Mega Regency*, proses pemantauan pH dan nutrisi masih dilakukan secara manual menggunakan alat ukur portabel. Pengukuran dilakukan secara berkala tanpa adanya sistem pencatatan data historis yang terintegrasi. Akibatnya, perubahan nilai pH maupun konsentrasi nutrisi yang terjadi di antara waktu pengukuran tidak dapat diketahui secara langsung. Kondisi tersebut berpotensi menyebabkan keterlambatan dalam pengambilan tindakan korektif ketika parameter larutan berada di luar rentang yang direkomendasikan. Selain itu, pengelola greenhouse mengalami

kesulitan dalam melakukan evaluasi kondisi larutan nutrisi secara berkelanjutan karena tidak tersedianya data monitoring yang terdokumentasi. Perkembangan teknologi *Internet of Things* (IoT) memungkinkan proses monitoring dan kontrol dilakukan secara otomatis dan real-time melalui integrasi sensor, mikrokontroler, jaringan komunikasi, serta platform cloud. Penelitian sebelumnya telah menunjukkan bahwa teknologi IoT mampu meningkatkan efektivitas pengelolaan sistem hidroponik. Jain dan Kaur mengembangkan sistem kontrol pH dan *Electrical Conductivity* (EC) berbasis IoT pada hidroponik NFT yang memungkinkan pemantauan dan pengendalian kondisi larutan secara jarak jauh [3]. Linelson dan Saputri mengembangkan perangkat monitoring multi-parameter berbasis ESP32 yang mampu memantau kondisi nutrisi dan lingkungan hidroponik secara real-time melalui platform cloud [4]. Putra dkk. menerapkan sistem otomasi hidroponik NFT berbasis IoT untuk mendukung pengelolaan budidaya secara lebih efisien [5]. Sementara itu, Bakriansyah dan Daud menunjukkan bahwa integrasi sensor dan aktuator berbasis IoT dapat digunakan untuk melakukan monitoring dan kontrol parameter air, keasaman, serta nutrisi secara otomatis [6]. Widyadari dan Sultoni mengembangkan sistem kontrol dan monitoring pH berbasis ESP32 pada sistem smart aquaponic yang mampu melakukan pengawasan kondisi air secara real-time dan mendukung proses pengendalian secara otomatis [7]. Penelitian lain yang dilakukan oleh Prasetyoaji dkk. mengembangkan sistem hidroponik berbasis IoT menggunakan pendekatan rule-based yang mengintegrasikan sensor pH dan TDS untuk mendukung monitoring serta pengendalian kondisi larutan nutrisi secara otomatis [8].

Tabel 1. Perbandingan Penelitian Terdahulu

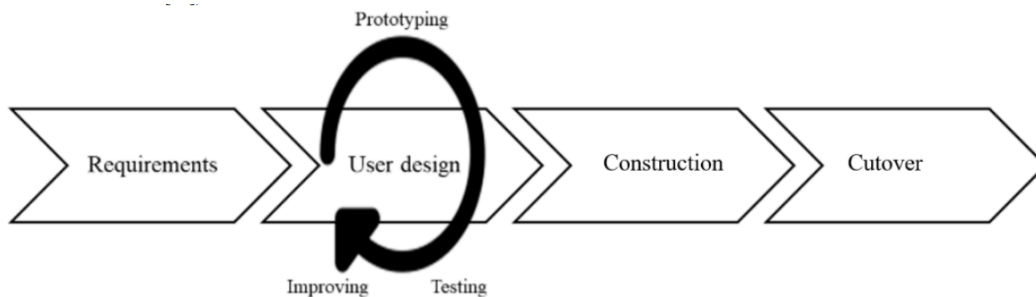
Peneliti	Judul Penelitian	Metode/Teknologi	Hasil atau Kontribusi
Jain dan Kaur [3]	<i>Design and Implementation of an IoT-based Automated EC and pH Control System in an NFT-based Hydroponic Farm</i>	IoT, ESP32, kontrol pH dan EC	Mengembangkan sistem monitoring dan kontrol pH serta EC secara real-time pada hidroponik NFT berbasis IoT.
Linelson dan Saputri [4]	<i>Design of a Nutrient and Environment Monitoring IoT Device in Vertical Hydroponic System</i>	ESP32, cloud monitoring	Mengembangkan perangkat monitoring multi-parameter untuk memantau kondisi nutrisi dan lingkungan hidroponik secara real-time melalui platform cloud.
Putra dkk. [5]	<i>Rancang Bangun Sistem Otomatisasi Hidroponik NFT Berbasis Internet of Things (IoT)</i>	IoT automation	Menerapkan sistem otomasi hidroponik NFT berbasis IoT untuk meningkatkan efisiensi pengelolaan budidaya tanaman.
Bakriansyah dan Daud [6]	<i>Prototype of Automatic Monitoring and Control System for Water Supply, Acidity, and Nutrition in IoT Based DFT Hydroponics</i>	IoT monitoring and control	Mengembangkan sistem monitoring dan kontrol otomatis terhadap parameter air, keasaman, dan nutrisi pada hidroponik berbasis IoT.
Widyadari dan Sultoni [7]	<i>Implementasi Sistem Kontrol dan Monitoring pH dan Suhu Air pada Sistem Smart Aquaponic</i>	ESP32, monitoring dan kontrol	Menerapkan sistem monitoring dan kontrol pH serta suhu air secara real-time pada lingkungan budidaya aquaponik.
Prasetyoaji dkk. [8]	<i>Design of Smart Hydroponics Based on IoT Using Rule-Based System on Hydroponic Wick System</i>	Rule-Based System, IoT	Mengintegrasikan sensor pH dan TDS untuk monitoring dan kontrol larutan nutrisi menggunakan pendekatan rule-based.

Berdasarkan Tabel 1, penelitian terdahulu telah menunjukkan bahwa teknologi *Internet of Things* (IoT) mampu mendukung proses monitoring dan kontrol pada sistem hidroponik secara lebih efektif. Berbagai penelitian telah berhasil mengintegrasikan sensor, mikrokontroler, dan platform cloud untuk memantau maupun mengendalikan parameter

larutan nutrisi secara real-time. Namun, sebagian besar penelitian masih berfokus pada fungsi monitoring dan kontrol tanpa membahas secara mendalam aspek kestabilan pembacaan sensor ketika beberapa sensor digunakan secara bersamaan dalam satu media larutan nutrisi. Selain itu, implementasi sistem monitoring dan kontrol multi-parameter pada lingkungan hidroponik nyata masih menghadapi tantangan terkait integrasi sensor, kualitas akuisisi data, serta keandalan pengiriman data ke platform cloud secara berkelanjutan. Prasetyoaji dkk. menerapkan mekanisme pembacaan sensor secara bergantian untuk mengurangi potensi gangguan antar sensor dalam satu sistem [8]. Meskipun demikian, pembahasan mengenai interferensi antara sensor pH dan sensor TDS yang beroperasi pada larutan nutrisi yang sama masih relatif terbatas. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa aspek keandalan akuisisi data dan integrasi sensor masih memerlukan kajian lebih lanjut pada implementasi sistem hidroponik berbasis IoT. Berdasarkan research gap tersebut, penelitian ini mengimplementasikan sistem monitoring dan kontrol larutan nutrisi berbasis *Internet of Things* (IoT) pada hidroponik metode *Nutrient Film Technique* (NFT) menggunakan mikrokontroler ESP32. Sistem mengintegrasikan sensor pH sebagai parameter utama kontrol, sensor TDS untuk monitoring dan kontrol nutrisi, sensor suhu DS18B20, serta sensor ultrasonik untuk memantau ketinggian air tandon secara *real-time*. Data sensor diproses menggunakan metode *Exponential Moving Average* (EMA) untuk meningkatkan stabilitas pembacaan sensor, sedangkan mekanisme kontrol menggunakan metode hysteresis untuk menjaga parameter tetap berada pada rentang yang telah ditentukan. Data monitoring dikirimkan ke platform ThingsBoard menggunakan protokol MQTT sehingga dapat diakses melalui dashboard berbasis cloud secara real-time. Kontribusi penelitian ini terletak pada implementasi sistem monitoring dan kontrol multi-parameter pada lingkungan hidroponik NFT nyata, penerapan metode EMA dan hysteresis untuk meningkatkan keandalan sistem, serta analisis interferensi antara sensor pH dan sensor TDS selama proses operasional.

2. METODE PENELITIAN

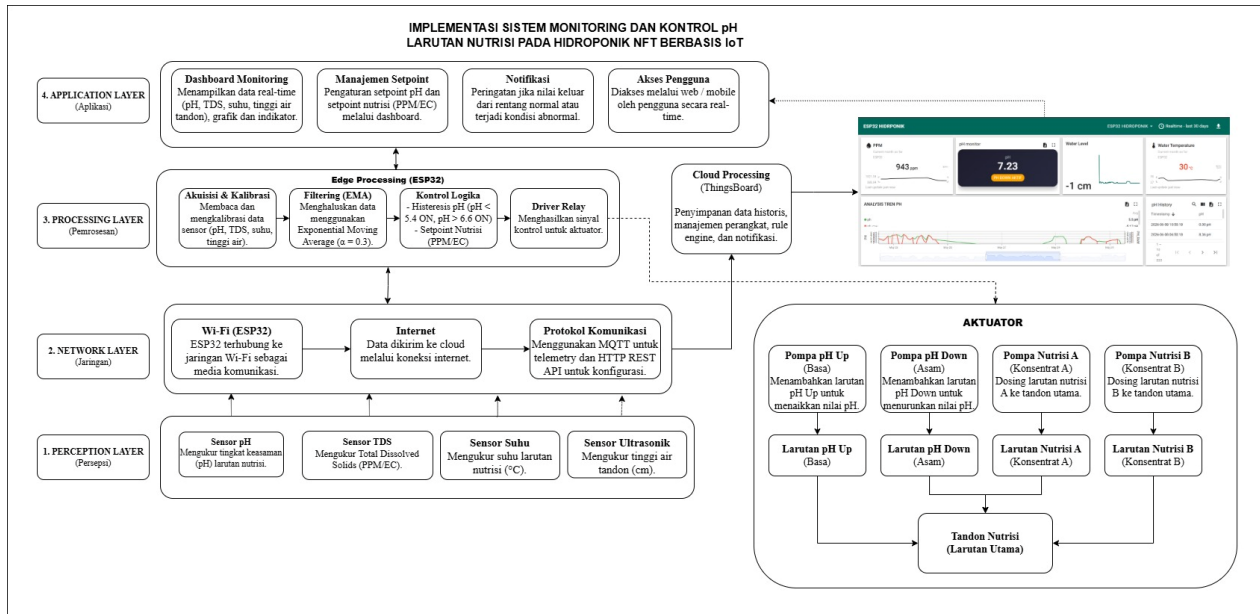
Metode pengembangan sistem yang digunakan dalam penelitian ini adalah Rapid Application Development (RAD). Pemilihan metode ini didasarkan pada kebutuhan pengembangan perangkat keras dan lunak IoT yang memerlukan pengujian, validasi kalibrasi sensor, serta perbaikan sistem secara iteratif di lapangan. Tahapan model pengembangan RAD adaptasi dari [9] diilustrasikan secara terstruktur pada Gambar 1.



Gambar 1. Tahapan Model Pengembangan RAD

Arsitektur Sistem

Sistem dirancang menggunakan pendekatan berlapis (*layered architecture*) yang terdiri dari *Perception Layer*, *Network Layer*, *Processing Layer*, dan *Application Layer*. Arsitektur sistem secara keseluruhan ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Arsitektur Sistem Monitoring dan Kontrol pH Larutan Nutrisi Berbasis IoT

Pada *Perception Layer*, sistem melakukan akuisisi data menggunakan sensor pH (PH-4502C), sensor TDS (TDS Meter V1.0), sensor suhu DS18B20, dan sensor ultrasonik HC-SR04. Pada *Network Layer*, data dikirimkan oleh mikrokontroler ESP32 melalui jaringan WiFi menggunakan protokol MQTT ke platform ThingsBoard Cloud. MQTT merupakan protokol komunikasi ringan (lightweight protocol) yang banyak digunakan pada aplikasi Internet of Things karena efisien dalam penggunaan bandwidth dan sumber daya perangkat [10]. Platform ThingsBoard digunakan sebagai media visualisasi data, penyimpanan telemetri, dan pengelolaan perangkat IoT secara terpusat [11]. Pada *Processing Layer*, pemrosesan dilakukan pada sisi *edge* (ESP32) menggunakan algoritma *Exponential Moving Average* (EMA) untuk *filtering* data dan metode *hysteresis* untuk kontrol pH. Pada *Application Layer*, data ditampilkan melalui *dashboard* ThingsBoard berbasis web.

Perangkat Keras

Komponen utama perangkat keras meliputi mikrokontroler ESP32 yang digunakan sebagai pengendali utama sistem karena mendukung konektivitas WiFi terintegrasi serta memiliki kemampuan pemrosesan yang memadai untuk aplikasi monitoring dan kontrol berbasis IoT [12]. Untuk meningkatkan resolusi dan stabilitas pembacaan sensor analog digunakan modul ADC eksternal ADS1115 16-bit yang berfungsi mengakuisisi data dari sensor pH dan sensor TDS. Sensor pH PH-4502C digunakan untuk mengukur tingkat keasaman larutan nutrisi, sedangkan sensor TDS Meter V1.0 digunakan untuk mengukur konsentrasi padatan terlarut sebagai indikator kepekatan nutrisi dalam larutan hidroponik [13]. Selain itu, sensor suhu DS18B20 digunakan untuk memantau suhu larutan nutrisi dan sensor ultrasonik HC-SR04 digunakan untuk mengukur ketinggian air pada tandon. Aktuator sistem terdiri atas pompa pH Up, pompa pH Down, pompa Nutrisi A, dan pompa Nutrisi B yang dikendalikan melalui modul relay 4 channel. Sensor pH dihubungkan pada kanal A1 ADS1115, sedangkan sensor TDS dihubungkan pada kanal A0. Relay dikonfigurasi pada GPIO 18, GPIO 17, GPIO 16, dan GPIO 19 untuk mengendalikan proses penyesuaian pH

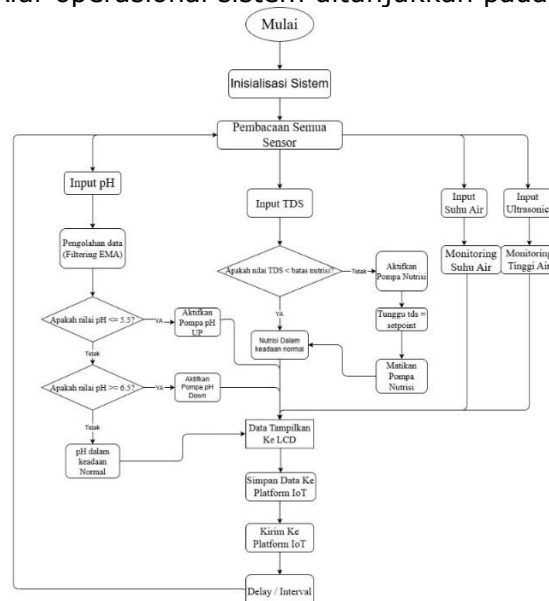
serta penambahan nutrisi secara otomatis. Informasi kondisi sistem juga ditampilkan secara lokal melalui LCD 16x2 dengan antarmuka I2C.

Perangkat Lunak dan Algoritma

Firmware ESP32 dikembangkan menggunakan Arduino IDE dengan bahasa pemrograman C++. Untuk meningkatkan kestabilan pembacaan sensor pH, diterapkan metode Exponential Moving Average (EMA) [14]. EMA digunakan karena mampu mengurangi fluktuasi data akibat noise sensor dengan memberikan bobot yang lebih besar pada data terbaru sehingga mampu meredam fluktuasi pembacaan tanpa mengurangi kemampuan sistem dalam merespons perubahan nilai pH secara real-time. Persamaan EMA yang digunakan ditunjukkan pada Persamaan (1).

$$EMA_t = (\alpha \times Raw_t) + ((1 - \alpha) \times EMA_{t-1}) \quad (1)$$

Dengan EMA_t adalah nilai hasil filtering pada waktu ke $-t$, RAW_t merupakan data hasil pembacaan sensor pada waktu ke $-t$, EMA_{t-1} adalah nilai EMA sebelumnya, dan α merupakan faktor smoothing yang pada penelitian ini ditetapkan sebesar 0,3. Metode hysteresis [15] diterapkan sebagai mekanisme kontrol pH untuk mencegah aktivasi relay secara berulang (chattering) ketika nilai pH berada di sekitar batas kontrol. Data hasil pembacaan sensor dikirimkan ke platform ThingsBoard menggunakan protokol Message Queuing Telemetry Transport (MQTT). Protokol MQTT dipilih karena memiliki overhead komunikasi yang rendah sehingga sesuai untuk implementasi Internet of Things (IoT) [10]. Data yang diterima kemudian disimpan dan divisualisasikan melalui dashboard ThingsBoard untuk mendukung proses monitoring secara real-time [11]. Sistem menggunakan batas bawah sebesar 5,4 dan batas atas sebesar 6,6 sebagai deadband kontrol. Pompa pH Up diaktifkan ketika nilai pH kurang dari 5,4, sedangkan pompa pH Down diaktifkan ketika nilai pH lebih dari 6,6. Ketika nilai pH berada pada rentang 5,4–6,6, sistem tidak melakukan aksi kontrol sehingga stabilitas aktuatur dapat terjaga. Selain itu, sistem mendukung konfigurasi parameter kontrol secara jarak jauh melalui mekanisme *Remote Procedure Call* (RPC) pada platform ThingsBoard. Melalui fitur ini, pengguna dapat mengubah nilai setpoint dan parameter operasional tanpa perlu melakukan pemrograman ulang pada perangkat. Alur operasional sistem ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 3. Diagram Alur Utama Sistem

Metode Pengujian

Pengujian sistem dilakukan menggunakan dua metode: (1) *black-box testing* untuk memverifikasi seluruh kebutuhan fungsional sistem (KF-01 hingga KF-11), dan (2) pengujian akurasi sensor dengan membandingkan pembacaan sensor sistem terhadap alat ukur referensi (*pH meter portable*, *TDS meter portable*, dan penggaris manual). Setiap parameter diukur sebanyak 10 kali pengukuran terpisah pada kondisi larutan yang sama untuk mendapatkan nilai *Mean Absolute Error* (MAE) dan persentase akurasi akhir.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

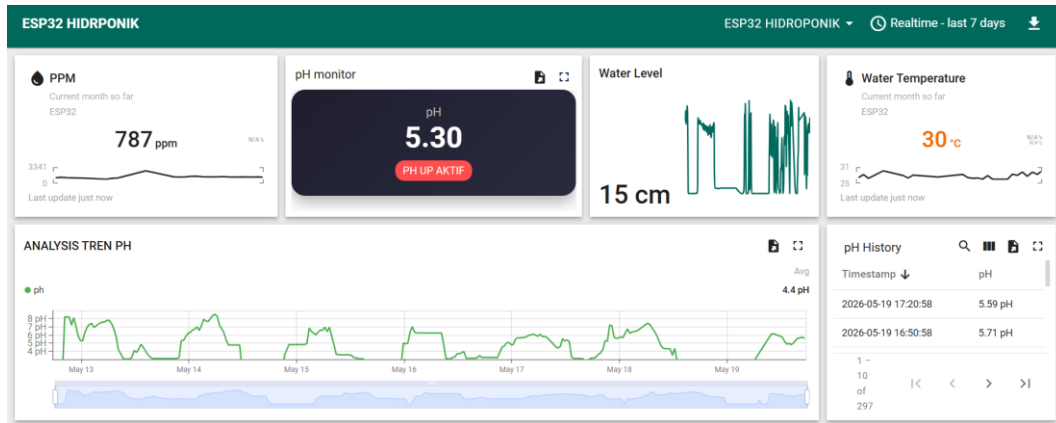
Implementasi Sistem dan Antarmuka Dashboard

Sistem telah berhasil diimplementasikan sepenuhnya pada instalasi hidroponik NFT di *greenhouse* Mega Regency. Komponen pengontrol utama berbasis mikrokontroler ESP32 terpasang pada *expansion board* 30 pin, didukung modul ADC eksternal ADS1115, modul *relay 4 channel*, dan LCD 16x2 sebagai media informasi lokal. Sistem juga dilengkapi sensor pH, sensor TDS, sensor suhu DS18B20, dan sensor ultrasonik yang terintegrasi untuk melakukan monitoring kondisi larutan nutrisi secara *real-time*. Implementasi fisik sistem pada instalasi hidroponik NFT ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Implementasi Sistem Monitoring dan Kontrol pH Berbasis IoT pada Instalasi Hidroponik NFT

Pada tahap implementasi, sensor pH ditempatkan pada jalur keluaran sirkulasi NFT sebelum larutan kembali ke tandon, sedangkan sensor TDS dipasang di dalam tandon nutrisi utama. Pemisahan posisi sensor dilakukan untuk mengurangi gangguan interferensi elektrokimia yang dapat memengaruhi kestabilan pembacaan data. Seluruh data hasil pengukuran diproses oleh ESP32 menggunakan metode *Exponential Moving Average* (EMA) sebelum dikirimkan ke platform cloud melalui protokol MQTT. Antarmuka monitoring dan kontrol dikonfigurasi menggunakan platform ThingsBoard yang berfungsi sebagai pusat visualisasi data telemetri dan pengelolaan perangkat IoT. Dashboard menampilkan informasi nilai pH, konsentrasi nutrisi (TDS), suhu larutan, ketinggian air tandon, serta grafik historis untuk memantau perubahan parameter dari waktu ke waktu serta panel kendali untuk memodifikasi parameter *setpoint* dan status aktuator secara interaktif. Pemanfaatan platform cloud memungkinkan proses monitoring dilakukan secara *real-time* sekaligus menyediakan data historis yang dapat digunakan untuk evaluasi kondisi sistem hidroponik secara berkelanjutan. Tampilan dashboard sistem ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Dashboard Monitoring dan Kontrol Berbasis ThingsBoard

Melalui dashboard ThingsBoard, pengguna dapat memantau kondisi sistem secara real-time sekaligus melakukan pengaturan parameter kontrol dari jarak jauh. Fasilitas penyimpanan data historis juga memungkinkan evaluasi performa sistem dilakukan secara berkelanjutan. Hasil implementasi ini sejalan dengan penelitian Linelson dan Saputri yang memanfaatkan teknologi IoT dan cloud untuk monitoring parameter nutrisi dan lingkungan hidroponik secara jarak jauh [4].

Pengujian Fungsionalitas (Black-Box Testing)

Pengujian fungsional dilakukan secara menyeluruh terhadap semua parameter kebutuhan fungsional sistem, mulai dari kode KF-01 hingga KF-11. Hasil pengujian menunjukkan seluruh modul sirkuit dan program bekerja dengan tingkat keberhasilan 100% tanpa malafungsi. Ringkasan hasil pengujian fungsionalitas dipetakan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Black-box Testing

Kode	Fungsi yang Diuji	Hasil
KF-01	Pembacaan sensor pH	Berhasil — nilai pH terbaca pada LCD dan dashboard
KF-02	Pembacaan sensor TDS	Berhasil — nilai TDS (ppm) terbaca berkelanjutan
KF-03	Pembacaan sensor suhu	Berhasil — suhu 29,2°C terbaca stabil
KF-04	Monitoring tinggi air	Berhasil — ketinggian air terbaca (contoh: 15 cm)
KF-05	Tampilan data real-time	Berhasil — data tampil di dashboard ThingsBoard
KF-06	Penyimpanan data historis	Berhasil — 212 entri tersimpan di ThingsBoard
KF-07	Filtering EMA	Berhasil — ph_valid=true, EMA stabil 5,59–5,91
KF-08	Kontrol pH Up otomatis	Berhasil — pH 5,30 → status 'PH UP AKTIF'
KF-09	Kontrol pH Down otomatis	Berhasil — pH 7,35 → status 'PH DOWN AKTIF'
KF-10	Penghentian dosing otomatis	Berhasil — pH 6,34 → status 'STABIL'
KF-11	Pengiriman data MQTT	Berhasil — data terkirim ke ThingsBoard real-time

Pengujian Akurasi Sensor

Proses pengujian dilakukan dengan cara membandingkan nilai pembacaan masing-masing sensor pada sistem dengan nilai yang dihasilkan oleh alat ukur referensi secara bersamaan pada kondisi yang sama. Pengukuran dilakukan sebanyak beberapa kali untuk mendapatkan data yang representatif. Selanjutnya dihitung nilai selisih (*error*) antara

pembacaan sensor sistem dengan alat referensi, nilai *Mean Absolute Error* (MAE), serta persentase akurasi menggunakan persamaan berikut:

$$\text{Error} = \text{Nilai Referensi} - \text{Nilai Sensor} \quad (2)$$

$$\text{Akurasi}(\%) = \left(1 - \frac{\text{MAE}}{\text{Nilai Referensi}}\right) \times 100\% \quad (3)$$

Pengujian akurasi dilakukan dengan membandingkan pembacaan sensor sistem terhadap alat ukur referensi sebanyak 10 kali pengukuran untuk setiap parameter. Ringkasan hasil pengukuran ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Ringkasan Data Pengujian Sensor

Sensor	Jumlah Pengujian	Nilai referensi rata-rata	Nilai sensor rata-rata
pH (PH-4502C)	10	6,70	6,979
TDS (Meter V1.0)	10	748,7 ppm	758,7 ppm
Ultrasonik (HC-SR04)	10	16,8 cm	16,8 cm

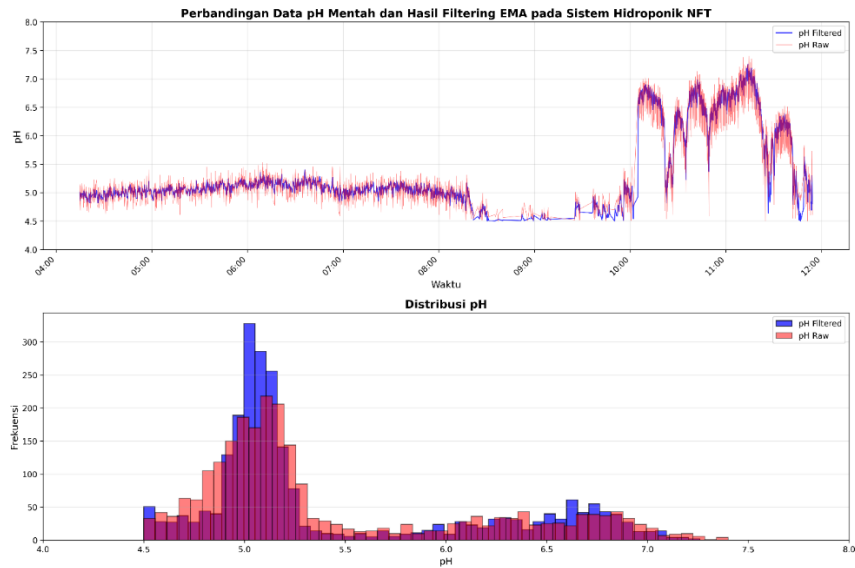
Berdasarkan data pengujian pada Tabel 3, selanjutnya dilakukan perhitungan nilai *Mean Absolute Error* (MAE), persentase error, dan tingkat akurasi untuk masing-masing sensor menggunakan Persamaan (2) dan Persamaan (3). Hasil perhitungan disajikan pada Tabel 3.

Tabel 4. Hasil Akurasi Sensor

Sensor	MAE	Error (%)	Akurasi (%)
pH (PH-4502C)	0,279	4,16%	95,84%
TDS (Meter V1.0)	10,0 ppm	1,34%	98,66%
Ultrasonik (HC-SR04)	0,48 cm	2,86%	97,14%

Analisis Kinerja Sistem dan Algoritma Filter

Berdasarkan data pada Tabel 4, sensor pH analog menghasilkan akurasi 95,84% dengan deviasi MAE 0,279 unit. Selisih pembacaan berkisar antara 0,19 hingga 0,33 unit, di mana purwarupa konsisten mendeteksi nilai sedikit lebih tinggi dibanding alat ukur referensi. Fenomena ini dipengaruhi oleh karakteristik alami elektroda analog yang sensitif terhadap temperatur sekitar sehingga memerlukan prosedur kalibrasi berkala. Tingkat akurasi yang diperoleh masih berada pada rentang yang sebanding dengan penelitian Ari Saputra dkk. yang melaporkan akurasi sensor PH-4502C sebesar 98,92% pada sistem hidroponik [13]. Sensor TDS mencatatkan akurasi tertinggi mencapai 98,66% dengan nilai MAE hanya 10 ppm. Sedikit lonjakan selisih sebesar 37 ppm terdeteksi pada pengujian ke-7, hal tersebut dipicu oleh fase transisi kalkulasi algoritma EMA ketika konsentrasi zat hara belum tersebar merata di dalam air tandon. Hasil tersebut menunjukkan kinerja pengukuran yang baik dan sejalan dengan penelitian Ari Saputra dkk. yang memperoleh akurasi sensor TDS sebesar 98,52% [13]. Sementara itu, sensor ultrasonik bekerja optimal dengan tingkat akurasi 97,14% dan galat MAE sebesar 0,48 cm. Kecepatan respons sistem kendali tertutup (closed-loop) mencatatkan durasi ± 4 detik per loop cycle untuk mendeteksi pergeseran parameter pH yang keluar dari zona *setpoint*. Untuk mengantisipasi bahaya overdosing zat kimia cair pada tandon, firmware diproteksi oleh fungsi interupsi waktu *intervalDosing* selama 300 detik. Penerapan algoritma filter digital EMA dengan koefisien $\alpha = 0,3$ terbukti handal mereduksi riak noise frekuensi tinggi.



Gambar 6. Perbandingan Data pH Mentah dan Data Hasil Filtering EMA

Gambar 6 menunjukkan perbandingan antara data pH mentah (*ph_raw*) dan data hasil filtering menggunakan metode Exponential Moving Average (EMA) dengan nilai α sebesar 0,3. Terlihat bahwa kurva hasil filtering mampu mengikuti tren perubahan pH dengan lebih stabil dibandingkan data mentah. Fluktuasi sesaat akibat gangguan pembacaan sensor dapat direduksi tanpa menghilangkan karakteristik perubahan nilai pH pada larutan nutrisi. Secara kuantitatif, sinyal mentah yang semula berfluktuasi pada rentang 5,490–6,650 berhasil dihaluskan menjadi kurva yang lebih stabil pada rentang 5,59–5,91. Hasil tersebut menunjukkan bahwa metode EMA efektif digunakan sebagai filter digital pada sistem monitoring hidroponik berbasis IoT dan mampu mereduksi fluktuasi pembacaan hingga 0,74 unit pH. Dari aspek durabilitas operasional jangka panjang, purwarupa mampu bekerja secara kontinu mengamankan total 212 log data telemetri di dalam ThingsBoard. Sistem mikrokontroler juga diproteksi oleh fitur *hardware watchdog timer* selama 30 detik serta perintah *software restart* berkala setiap 12 jam untuk mencegah terjadinya kegagalan sistem (*freezing*). Pengiriman data berkala dilakukan setiap ± 34 detik memanfaatkan keandalan protokol MQTT.

Evaluasi Kinerja Kontrol Hysteresis

Pengujian kontrol hysteresis dilakukan untuk mengevaluasi respons sistem terhadap perubahan nilai pH larutan nutrisi berdasarkan batas bawah (*lower threshold*) sebesar 5,5 dan batas atas (*upper threshold*) sebesar 6,5. Sistem dirancang untuk mengaktifkan pompa pH Up ketika nilai pH berada di bawah batas bawah dan mengaktifkan pompa pH Down ketika nilai pH melebihi batas atas. Apabila nilai pH berada pada rentang 5,5–6,5, sistem tidak melakukan tindakan koreksi sehingga aktuatur tetap dalam kondisi tidak aktif.

Tabel 5. Hasil Pengujian Kontrol Hysteresis

Nilai pH	Kondisi Sistem	Status Aktuatur
5,2	Kurang dari Batas Bawah	Pompa pH Up Aktif
6,1	Dalam Rentang Hysteresis	Tidak Aktif
6,8	Lebih dari Batas Atas	Pompa pH Down Aktif

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 5, metode hysteresis mampu bekerja sesuai dengan logika kontrol yang dirancang. Ketika nilai pH berada pada rentang 5,5–6,5, sistem tidak mengaktifkan aktuator sehingga dapat mengurangi frekuensi *switching* relay akibat fluktuasi kecil pembacaan sensor. Sebaliknya, saat nilai pH keluar dari rentang tersebut, sistem secara otomatis mengaktifkan aktuator yang sesuai untuk mengembalikan kondisi larutan nutrisi ke rentang yang diinginkan. Penerapan hysteresis juga membantu mencegah terjadinya relay chattering yang berpotensi mempercepat keausan komponen aktuator dan menurunkan stabilitas sistem control.

Analisis Komunikasi MQTT dan Thingsboard

Analisis komunikasi MQTT dan ThingsBoard dilakukan untuk mengetahui kemampuan sistem dalam mengirim, menerima, dan menyimpan data telemetri dari ESP32 ke platform cloud. Pengujian dilakukan selama 24 jam dengan mengamati data sensor yang berhasil tersimpan pada ThingsBoard. Hasil penyimpanan data telemetri ditunjukkan pada Gambar 7.

Time series table

Realtime - last 1 day

Timestamp	dosing_interval_seconds	ph	ph_high	ph_low	ph_valid	relay1	relay2	relay3	relay4	tds	tds_target	temp	temp_valid	water	ph_raw	ph_volt
2026-06-21 15:17:32		7.86			true	false	false	false	false	1035		30.9	true	29.1	7.740	1.80300
2026-06-21 15:17:24		7.83			true	false	false	false	false	1049		30.8	true	29.1	7.700	1.80420
2026-06-21 15:16:36		7.96			true	false	false	false	false	943		30.8	true	29.1	7.770	1.80220
2026-06-21 15:16:30		8.1			true	false	false	false	false	951		30.8	true	29.1	8.570	1.77940
2026-06-21 15:16:15		8.0			true	false	false	false	false	951		30.8	true	29.1	7.730	1.80340
2026-06-21 15:16:12		8.11			true	false	false	false	false	949		30.8	true	29.1	8.620	1.77800
2026-06-21 15:15:56		7.94			true	false	false	false	false	954		30.8	true	29.1	7.940	1.79740
2026-06-21 15:15:47		7.95			true	false	false	false	false	966		30.8	true	29.1	7.930	1.79780
2026-06-21 15:15:27		7.93			true	false	false	false	false	979		30.8	true	29.1	7.880	1.79920
2026-06-21 15:15:21		8.04			true	false	false	false	false	993		30.8	true	29.1	8.120	1.79230

Items per page: 10 1 - 10 of 5441

Gambar 7. Data telemetri yang tersimpan pada platform ThingsBoard selama pengujian

Berdasarkan Gambar 7, sistem berhasil mengirim dan menyimpan data telemetri yang meliputi nilai pH, TDS, suhu, ketinggian air, serta status aktuator ke platform ThingsBoard menggunakan protokol MQTT. Selama periode pengujian 24 jam tercatat sebanyak 5441 data telemetri berhasil tersimpan. Jumlah data tersebut menunjukkan bahwa proses komunikasi antara ESP32 dan platform cloud dapat berjalan secara kontinu sehingga mendukung kebutuhan monitoring hidroponik secara real-time dan penyimpanan data historis untuk keperluan evaluasi sistem.

Penanganan Gangguan Elektrokimia

Temuan ilmiah krusial dalam penelitian ini adalah adanya fenomena interferensi elektrokimia yang parah antara *probe* sensor pH dan sensor TDS saat diletakkan bersamaan dalam satu ruang tandon nutrisi. Arus DC konduktivitas dari sensor TDS merambat melalui air dan merusak pembacaan tegangan analog mikro-volt membran sensor pH. Penanganan masalah ini diselesaikan melalui tiga eksperimen mitigasi

bertahap. Tahap pertama dilakukan dengan pemasangan kapasitor penyaring (*decoupling*) pada jalur suplai tegangan analog, namun metode ini hanya mampu mereduksi *noise* riak kecil dan gagal menstabilkan nilai pH. Selanjutnya, tahap kedua menerapkan skema sakelar daya elektronik (*power switching*) menggunakan transistor untuk mengaktifkan sensor secara bergantian (*interlocking mechanism*). Langkah ini membuahkan hasil, tetapi berdampak pada membengkaknya waktu siklus eksekusi program (*loop cycle time*) pada ESP32. Sebagai solusi akhir pada tahap ketiga, dilakukan relokasi fisik letak komponen di mana *probe* sensor TDS dipertahankan di dalam wadah tandon utama, sedangkan *probe* sensor pH digeser ke area pipa luaran (*output*) sirkulasi talang NFT sebelum air kembali ke tandon. Pemisahan jarak fisik ini mampu mengurangi gangguan interferensi elektrokimia tanpa membebani memori kerja mikrokontroler. Adapun sisa gangguan mekanis akibat riak getaran dinamo pompa air diselesaikan secara internal melalui penulisan batas ambang tegangan *noise floor* sebesar 1,64V pada baris kode program *firmware*. Temuan interferensi antara sensor pH dan sensor TDS pada penelitian ini memiliki kesamaan dengan penelitian Prasetyoaji dkk. yang menerapkan mekanisme pembacaan sensor secara bergantian menggunakan relay untuk mengurangi gangguan antar sensor pada sistem hidroponik berbasis IoT [8]. Perbedaannya, penelitian ini menyelesaikan permasalahan melalui pemisahan lokasi pemasangan sensor pada titik aliran yang berbeda sehingga stabilitas pembacaan dapat ditingkatkan tanpa menambah kompleksitas kontrol maupun waktu siklus eksekusi mikrokontroler.

4. KESIMPULAN

Sistem monitoring dan kontrol pH serta kepekatan larutan nutrisi berbasis IoT menggunakan arsitektur ESP32 dan ThingsBoard pada metode hidroponik NFT telah berhasil dirancang dan diimplementasikan di Greenhouse Mega Regency. Sistem mampu memantau parameter pH, TDS, suhu, dan ketinggian air tandon secara berkelanjutan dengan kinerja akurasi instrumen masing-masing sebesar 95,84% untuk sensor pH, 98,66% untuk sensor TDS, dan 97,14% untuk sensor ultrasonik. Mekanisme kendali otomatis berbasis metode *hysteresis* terbukti responsif menjaga kestabilan pH air pada batas aman dengan durasi siklus tanggap ± 4 detik. Penerapan algoritma filter *Exponential Moving Average* (EMA) sukses meredam fluktuasi pembacaan analog hingga batas 0,74 unit pH sehingga mencegah kegagalan pemicuan *relay*. Permasalahan interferensi elektrokimia antar *probe* sensor dalam tandon berhasil diatasi secara efektif melalui teknik relokasi fisik komponen ke titik aliran pipa talang NFT yang berbeda. Sistem ini secara keseluruhan mampu memodernisasi tata kelola pertanian hidroponik menjadi lebih efektif, otomatis, dan berbasis dokumentasi data yang akurat. Meskipun sistem telah menunjukkan kinerja yang baik, penelitian ini masih terbatas pada implementasi skala greenhouse dengan mekanisme kontrol yang berfokus pada parameter pH dan nutrisi. Penelitian selanjutnya dapat mengembangkan metode kontrol yang lebih adaptif, mengintegrasikan prediksi berbasis machine learning, serta melakukan evaluasi performa sistem pada skala budidaya yang lebih besar untuk meningkatkan akurasi dan efisiensi pengelolaan hidroponik.

5. REFERENCES

- [1] O. D. Palmitessa, A. Signore, and P. Santamaria, "Advancements and future perspectives in nutrient film technique hydroponic system : a comprehensive review and bibliometric analysis," no. December, pp. 1–21, 2024, doi: 10.3389/fpls.2024.1504792.
- [2] F. V. Manurung, I., Putri, "Penerapan Sistem Hidroponik Budidaya Tanaman Tanpa Tanah untuk Pertanian Masa Depan," vol. 4, no. 4, pp. 5140–5145, 2023.

- [3] S. Jain and M. Kaur, "Design and Implementation of an IoT-based automated EC and pH Control System in an NFT-based Hydroponic Farm," vol. 14, no. 1, pp. 13078–13081, 2024.
- [4] R. Linelson, F. R. Saputri, and U. M. Nusantara, "Design of a Nutrient and Environment Monitoring IoT Device in Vertical Hydroponic System," vol. 17, no. 1, pp. 30–37, 2025.
- [5] N. E. Putra, P. Jaya, and U. N. Padang, "RANCANGAN BANGUN SISTEM OTOMATISASI HIDROPONIK NUTRIENT FILM TECHNIQUE (NFT) BAYAM HIJAU BERBASIS INTERNET OF THINGS (IOT)," vol. 5, pp. 3510–3518.
- [6] A. H. Bakriansyah and M. Daud, "Prototype of Automatic Monitoring and Control System for Water Supply , Acidity , and Nutrition in Internet of Things Based DFT Hydroponics Prototipe Sistem Pemantauan dan Pengendalian Otomatis Pasokan Air , Keasaman , dan Nutrisi pada Hidroponik DFT Berbasis Internet of Things," pp. 339–350, 2023.
- [7] S. Aquaponic *et al.*, "Implementasi Sistem Kontrol dan Monitoring PH dan Suhu Air Pada Sistem," vol. 15, no. 1, pp. 37–46, 2026.
- [8] M. Rio, E. Prasetyoaji, and L. Anifah, "Design of Smart Hydroponics Based on Internet of Things (IoT) Using Rule-Based System on Hydroponic Wick System," vol. 6, no. 1, pp. 51–62, 2025, doi: 10.46962/forteijeeri.v6i1.34.
- [9] A. A. Shaker, D. Ing, S. F. Austin, M. S. Jørgensen, and J. Aasted, "Facilitating In-House Mobile App Development Within Psychiatric Outpatient Services for Patients Diagnosed With Borderline Personality Disorder : Rapid Application Development Approach Corresponding Author :," vol. 10, 2023, doi: 10.2196/46928.
- [10] M. El Basoni, B. M. Mohammad, and E. Basoni, "A conceptual modeling approach of MQTT for IoT - based systems," *J. Electr. Syst. Inf. Technol.*, 2024, doi: 10.1186/s43067-024-00181-x.
- [11] H. Nurwasito, R. W. Adaby, U. Brawijaya, P. Korespondensi, and I. Mikro, "PENGEMBANGAN INTERNET OF THINGS (IOT) DALAM PEREKAMAN DATA DEVELOPMENT OF INTERNET OF THINGS (IOT) FOR MICROCLIMATE DATA LOGGING USING THE THINGSBOARD PLATFORM," vol. 11, no. 6, pp. 1385–1398, 2024, doi: 10.25126/jtiik.2024118987.
- [12] A. Abu and A. A. A. Shabaneh, "MethodsX Design of a smart hydroponics monitoring system using an ESP32 microcontroller and the Internet of Things," *MethodsX*, vol. 11, no. September, p. 102401, 2023, doi: 10.1016/j.mex.2023.102401.
- [13] A. Saputra, H. Nasbey, and M. Subekti, "KARAKTERISASI SENSOR TDS SEN-0244 DAN SENSOR PH-4502C DALAM IMPLEMENTASINYA," vol. XII, pp. 145–150, 2024.
- [14] M. H. Alkarim, I. Prasojo, S. A. Nugroho, E. Nugroho, and T. R. Elektromedis, "FILTER MENINGKATKAN AKURASI PEMBACAAN SENSOR SUHU MLX90614 PADA OBJEK DENGAN ELIMINASI," vol. 13, no. 3.
- [15] S. Amra, M. Kamal, A. Mardiyanto, J. Teknik, E. Politeknik, and N. Lhokseumawe, "Desain Kendali Otomatis Prototipe Inlet-Outlet Air Limbah KPPL 1,2,3,4," vol. 11, no. 1, 2025.