

INTEGRASI *MULTI-SENSOR* DAN *BYPASS* UNTUK STABILITAS NUTRISI HIDROPONIK *NFT IOT* KALE

Iqbal May Aryanto¹⁾, Abdul Gadir²⁾, Rizal Ashi Dicky³⁾

^{1) 2) 3)} Program Studi Teknologi rekayasa elektronika, jurusan Teknologi informasi, Politeknik Negeri Lampung
Jl. Soekarno Hatta No.10 Rajabasa Raya, Kec. Rajabasa, Kota Bandar Lampung, Lampung 35141

Email: ¹ iqbalmayaryanto@polinela.ac.id

Abstract

Precise nutrient management is a critical factor in the success of Nutrient Film Technique (NFT) hydroponic systems, particularly for kale (Brassica oleracea var. acephala), which requires relatively high nutrient availability. One of the major challenges in conventional NFT systems is the occurrence of nutrient gradients caused by higher nutrient uptake in the upstream section, resulting in uneven nutrient distribution toward downstream cultivation channels. This study aims to develop an Internet of Things (IoT)-based NFT hydroponic system that integrates a nutrient bypass distribution mechanism, a multi-sensor monitoring system, and fuzzy logic control to improve nutrient stability and distribution uniformity. Experiments were conducted over a seven-day period using four NFT growing channels containing a total of 12 kale plants. The system employs an ESP32 microcontroller to monitor pH and Total Dissolved Solids (TDS) parameters, while a Fuzzy Logic Controller (FLC) dynamically regulates peristaltic pump activation duration to maintain nutrient concentration and pH stability. Data were transmitted in real time using the MQTT protocol and visualized through InfluxDB and Grafana platforms. Experimental results demonstrated that the proposed bypass mechanism achieved highly uniform nutrient distribution, producing a concentration difference of 0 PPM during the final testing stages between the nutrient reservoir and the fourth cultivation channel. The system successfully maintained nutrient concentrations within a range of 808–882 PPM and pH values between 6.35 and 7.07 throughout the testing period. Sensor calibration results indicated an average pH measurement error of only 2.01%, demonstrating satisfactory accuracy for precision hydroponic applications. Furthermore, the total daily energy consumption of the system was measured at 550.656 Wh/day, indicating high operational efficiency. These findings confirm that the integration of a nutrient bypass mechanism, fuzzy logic control, and IoT technology can significantly enhance nutrient distribution uniformity, environmental stability, and the overall efficiency and sustainability of hydroponic cultivation systems.

Keywords: *distribution bypass, ESP32, fuzzy logic, IoT, multi-sensor, NFT hydroponics, nutrient stability.*

Abstrak

Pengelolaan nutrisi yang presisi merupakan faktor penting dalam keberhasilan sistem hidroponik *Nutrient Film Technique* (NFT), terutama pada budidaya kale (*Brassica oleracea* var. *acephala*) yang memiliki kebutuhan nutrisi relatif tinggi. Permasalahan utama pada sistem NFT konvensional adalah terjadinya gradien nutrisi akibat penyerapan unsur hara yang lebih besar pada bagian hulu sehingga menyebabkan distribusi nutrisi yang tidak merata pada bagian hilir. Penelitian ini bertujuan mengembangkan sistem hidroponik NFT berbasis *Internet of Things* (IoT) yang mengintegrasikan mekanisme *bypass* distribusi nutrisi, sistem multi-sensor, dan kendali logika *fuzzy* untuk meningkatkan stabilitas dan pemerataan nutrisi. Pengujian dilakukan selama tujuh hari pada empat jalur tanam NFT yang berisi total 12 tanaman kale. Sistem menggunakan mikrokontroler ESP32 untuk memantau parameter pH dan *Total Dissolved Solids* (TDS), sedangkan algoritma *Fuzzy Logic Controller* (FLC) digunakan untuk mengatur durasi aktivasi pompa peristaltik dalam menjaga kestabilan nutrisi dan pH. Data dikirim secara *real-time* menggunakan protokol *MQTT* dan divisualisasikan melalui *InfluxDB* serta *Grafana*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa mekanisme *bypass* mampu menghasilkan distribusi nutrisi yang sangat homogen dengan selisih konsentrasi 0 PPM pada pengujian tahap akhir antara tandon hingga pipa keempat. Sistem berhasil mempertahankan konsentrasi nutrisi pada rentang 808–882 PPM dan pH pada rentang 6,35–7,07 selama periode pengujian. Hasil kalibrasi sensor pH menunjukkan rata-rata persentase kesalahan sebesar 2,01%, menandakan tingkat akurasi yang baik untuk aplikasi hidroponik presisi. Selain itu, total konsumsi energi sistem tercatat sebesar



Jurnal Teknologi dan Sistem Tertanam is licensed under a [Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/).

550,656 Wh/hari yang menunjukkan efisiensi operasional yang tinggi. Hasil penelitian membuktikan bahwa integrasi mekanisme *bypass*, kendali *fuzzy*, dan teknologi IoT mampu meningkatkan keseragaman distribusi nutrisi, stabilitas lingkungan tumbuh, serta mendukung pengelolaan hidroponik yang lebih efisien dan berkelanjutan.

Kata Kunci: *bypass distribusi, ESP32, hidroponik NFT, Internet of Things, logika fuzzy, multi-sensor, pemerataan nutrisi.*

1. Pendahuluan

Transformasi sektor pertanian modern didorong oleh meningkatnya kebutuhan pangan global seiring pertumbuhan populasi dunia yang diproyeksikan mencapai 9,7 miliar jiwa pada tahun 2050. Kondisi tersebut menuntut peningkatan produktivitas pertanian sekaligus efisiensi penggunaan sumber daya, khususnya lahan dan air [1]. Salah satu teknologi yang berkembang untuk menjawab tantangan tersebut adalah sistem hidroponik, yang mampu menghasilkan produktivitas tinggi dengan penggunaan air yang lebih efisien dibandingkan budidaya konvensional berbasis tanah [2], [3].

Salah satu metode hidroponik yang banyak diterapkan adalah *Nutrient Film Technique* (NFT), yaitu sistem budidaya yang memanfaatkan aliran tipis larutan nutrisi pada zona perakaran tanaman secara kontinu [4], [5]. Sistem ini memungkinkan akar memperoleh nutrisi dan oksigen secara bersamaan sehingga mendukung pertumbuhan tanaman yang lebih optimal. Namun demikian, sistem NFT memiliki kelemahan berupa terjadinya gradien nutrisi, yaitu penurunan konsentrasi unsur hara dan oksigen terlarut pada bagian hilir akibat penyerapan oleh tanaman yang berada di bagian hulu [6], [7]. Kondisi tersebut dapat menyebabkan pertumbuhan tanaman menjadi tidak seragam meskipun konsentrasi nutrisi pada tandon masih berada dalam rentang yang sesuai.

Selain distribusi nutrisi, kestabilan parameter kualitas larutan seperti pH dan *Electrical Conductivity* (EC) juga berperan penting dalam menentukan keberhasilan budidaya hidroponik. Perubahan pH di luar rentang optimum dapat menghambat penyerapan unsur hara oleh tanaman melalui fenomena *nutrient lockout* [8], [9]. Tanaman kale (*Brassica oleracea* var. *acephala*) dipilih sebagai objek penelitian karena memiliki kebutuhan nutrisi yang relatif tinggi dan dikenal sebagai tanaman dengan kandungan nutrisi yang baik sehingga memerlukan pengelolaan larutan nutrisi yang stabil untuk mendukung pertumbuhan optimal [10].

Perkembangan teknologi *Internet of Things* (IoT) memungkinkan proses pemantauan parameter hidroponik dilakukan secara *real-time* menggunakan sensor yang terhubung dengan jaringan internet [11], [12]. Meskipun demikian, sebagian besar penelitian sebelumnya masih berfokus pada fungsi monitoring dan pengendalian dasar, sementara permasalahan distribusi nutrisi yang tidak merata pada sistem NFT belum banyak dibahas secara mendalam [13]. Oleh karena itu, diperlukan suatu pendekatan yang tidak hanya mampu melakukan pemantauan dan pengendalian otomatis, tetapi juga memperbaiki mekanisme distribusi larutan nutrisi agar lebih seragam di seluruh jalur tanam.

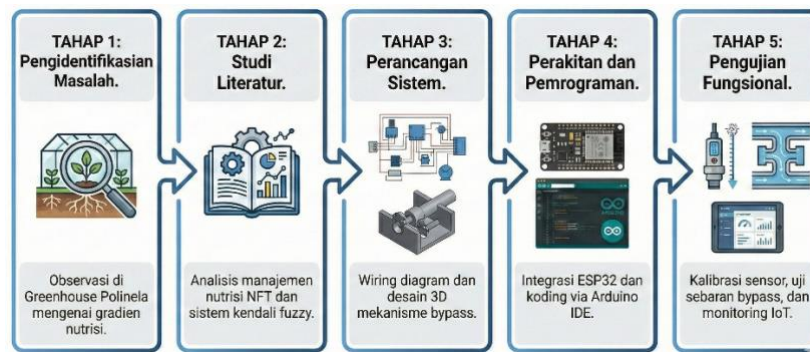
Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini mengembangkan sistem hidroponik NFT berbasis IoT yang mengintegrasikan mekanisme *bypass* distribusi nutrisi, sistem multi-sensor, dan kontrol logika *fuzzy*. Mekanisme *bypass* dirancang untuk meningkatkan homogenitas distribusi larutan nutrisi pada setiap jalur tanam [14], sedangkan logika *fuzzy* digunakan untuk mengatur proses koreksi pH dan konsentrasi nutrisi secara adaptif sehingga fluktuasi parameter dapat diminimalkan [15]. Kontribusi utama penelitian ini terletak pada integrasi antara rekayasa mekanik jalur *bypass*, pengendalian cerdas berbasis *fuzzy*, dan monitoring IoT untuk meningkatkan stabilitas nutrisi serta keseragaman distribusi larutan pada budidaya kale menggunakan sistem NFT.

2. Metode

Pendekatan eksperimental terapan yang digunakan dalam penelitian ini mencakup perancangan arsitektur sistem *IoT*, pengembangan algoritma kontrol cerdas, dan inovasi desain mekanik pada jalur distribusi air. Seluruh proses diorientasikan untuk menciptakan sinkronisasi antara pembacaan sensor kualitas air dengan aksi korektif pada unit aktuatur, yang dalam hal ini adalah pompa peristaltik.

2.1 Tahapan Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan melalui serangkaian tahapan sistematis yang disusun secara kronologis untuk menjamin integrasi sempurna antara komponen perangkat keras dan algoritma perangkat lunak. Tahapan penelitian dapat dilihat pada gambar 1 berikut :

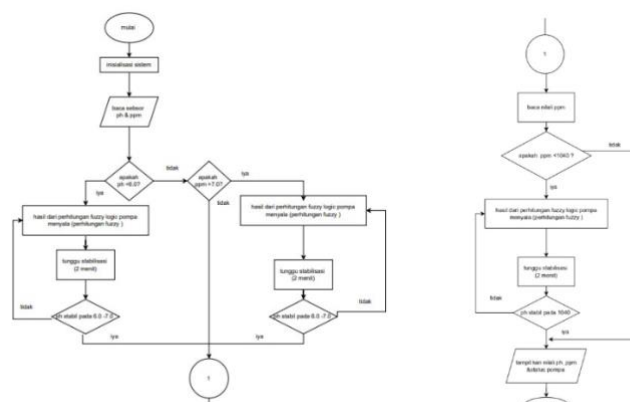


Gambar 1 Tahapan Penelitian

Urutan penelitian dimulai dengan identifikasi masalah melalui observasi *greenhouse* di Politeknik Negeri Lampung untuk menganalisis fenomena *gradien* nutrisi. Tahap berikutnya melakukan studi literatur untuk menetapkan *setpoint* pH (5,5-6,5) dan PPM yang ideal bagi kale. Perancangan Sistem mencakup desain fisik dan logika algoritma, yang kemudian direalisasikan pada tahap Perakitan dan Pemrograman. Penelitian ditutup dengan Pengujian Fungsional serta Analisis Data untuk memvalidasi efektivitas mekanisme *bypass* dan akurasi kontrol *fuzzy*.

2.2 Arsitektur Perangkat Keras dan Integrasi Sensor

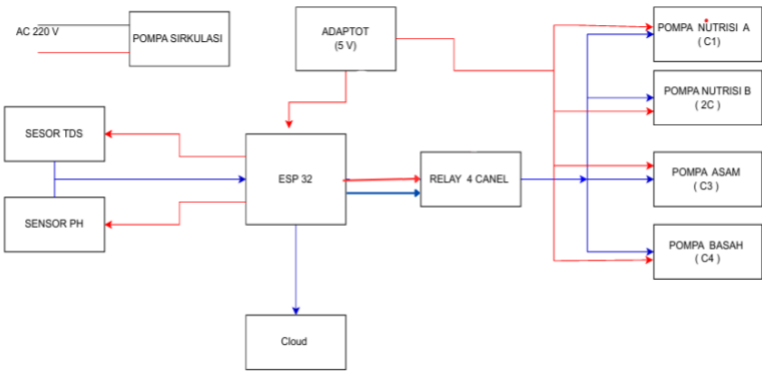
Integrasi sistem otomatis ini didasarkan pada perancangan logika yang terstruktur guna menjamin akurasi respon perangkat terhadap perubahan parameter kimia air secara kontinu. Alur logika ini menjadi pedoman utama bagi mikrokontroler dalam mengambil keputusan injeksi nutrisi tanpa memerlukan intervensi manual yang konstan.



Gambar 2 Flowchart Rencana Sistem

Flowchart sistem menjelaskan siklus tertutup (*closed-loop*) yang dimulai dari pembacaan data sensor pH dan TDS. Apabila parameter terdeteksi di luar ambang batas (PPM < 1040 atau pH $\neq$ 5,5-6,5), sistem akan memberikan instruksi aktif kepada relay sesuai durasi yang dihitung oleh algoritma *fuzzy*. Terdapat periode stabilisasi (*delay*) yang krusial setelah setiap fase injeksi untuk memastikan larutan hara telah terhomogenisasi sempurna sebelum dilakukan pembacaan ulang oleh sensor.

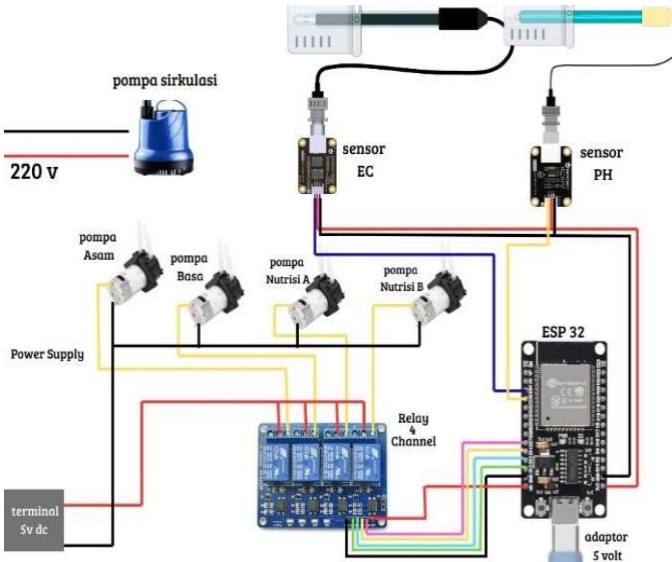
Struktur fungsional perangkat keras disusun dalam sebuah blok diagram untuk memvisualisasikan interaksi antar komponen utama secara sistematis. Diagram ini membagi sistem menjadi tiga bagian inti yaitu masukan, pemrosesan dan keluaran yang terhubung secara nirkabel ke platform awan, dapat dilihat pada gambar 3 berikut.



Gambar 3 Blok Diagram Sistem

Mikrokontroler ESP32 bertindak sebagai pusat kendali yang menerima sinyal analog dari sensor pH dan TDS melalui pin ADC. Setelah data diproses menggunakan logika *fuzzy*, ESP32 mengirimkan perintah digital ke modul Relay 4-Channel untuk mengendalikan empat unit pompa peristaltik. Komunikasi data ke server *database* menggunakan modul *Wi-Fi* internal untuk memfasilitasi monitoring jarak jauh melalui *platform* IoT.

Koneksi elektrik antar komponen dijabarkan melalui skema rangkaian *hardware* untuk meminimalkan gangguan sinyal (*noise*) pada proses pembacaan data sensor yang sangat sensitif. Perancangan skematik ini memastikan keamanan beban arus pada setiap jalur sirkuit serta distribusi daya yang stabil dari adaptor menuju seluruh modul elektronik.



Gambar 4 Skema Rangkaian Hardware

Skematik rangkaian pada gambar 4 menunjukkan pemisahan jalur arus AC 220V untuk pompa sirkulasi utama dan jalur DC 5V-12V untuk mikrokontroler serta pompa peristaltik. Penggunaan *optocoupler* pada modul relay berfungsi sebagai isolator untuk mencegah tegangan balik yang dapat merusak pin ESP32. Seluruh sensor analitik dihubungkan dengan kabel berpelindung untuk menjaga integritas data analog dari interferensi elektromagnetik pompa AC.

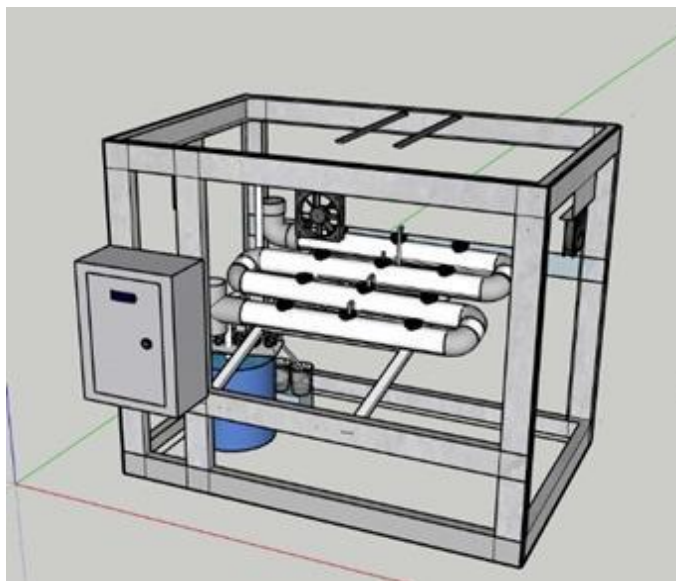
Rincian spesifikasi komponen elektronika yang digunakan untuk merealisasikan blok diagram tersebut dijabarkan pada Tabel 1.

Tabel 1 Spesifikasi Komponen Elektronika Utama

Komponen	Spesifikasi/Model	Peran dalam Sistem
Mikrokontroler	ESP32-WROOM-32	Unit pemrosesan pusat dan <i>gateway</i> IoT
Sensor pH	Analog pH Meter Pro	Pemantauan tingkat keasaman larutan
Sensor TDS	Analog TDS Meter	Pemantauan konsentrasi hara (PPM)
Aktuator Nutrisi	Pompa Peristaltik 12V	Injeksi presisi Nutrisi A dan B
Aktuator pH	Pompa Peristaltik 12V	Injeksi cairan pH <i>Up</i> dan pH <i>Down</i>
Pompa Utama	AC Submersible Pump	Sirkulasi air kontinu pada jalur NFT

2.3 Desain Mekanik Jalur *Bypass* Distribusi

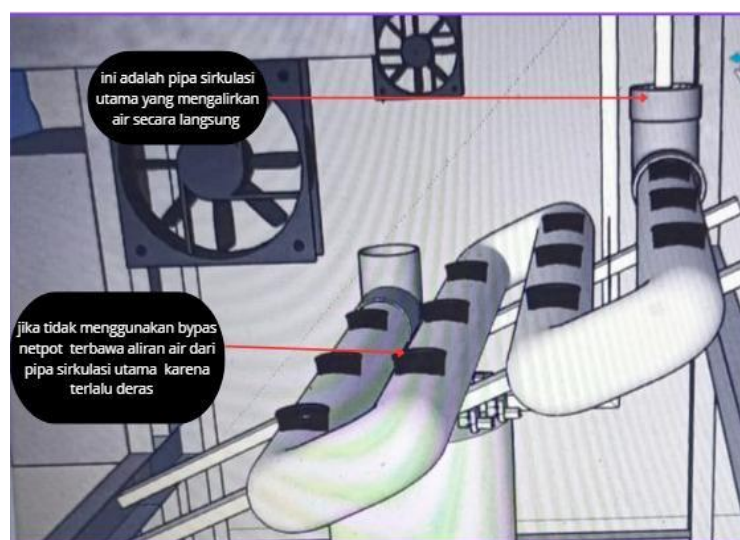
Desain fisik instalasi hidroponik dikembangkan secara modular untuk mengoptimalkan ruang tanam dan efisiensi distribusi larutan nutrisi pada sistem vertikal. Visualisasi 3D digunakan untuk memetakan tata letak komponen mekanis secara presisi, memastikan kemiringan *gully* sesuai dengan standar teknik NFT yang ideal.



Gambar 5 Desain 3D

Rancangan 3D pada gambar 5, menampilkan struktur rak tanam yang menampung empat baris NFT dengan tangki nutrisi di bagian bawah sebagai titik pusat sirkulasi. Tata letak panel kontrol diletakkan pada posisi yang terlindung dari kelembaban namun tetap mudah dijangkau untuk pemeliharaan. Desain ini memungkinkan pengamatan visual terhadap aliran larutan hara yang melewati akar tanaman kale di sepanjang pipa.

Mekanisme *bypass* distribusi paralel merupakan inovasi mekanis yang dirancang khusus untuk mengatasi ketimpangan konsentrasi hara pada *gully* tanam yang panjang. Berbeda dengan sistem konvensional, desain ini menggunakan jalur pipa tambahan untuk menyuntikkan larutan segar langsung ke zona kritis di bagian hilir.



Gambar 6 Mekanisme Jalur Bypass

Penjelasan mekanis gambar menunjukkan penggunaan selang PE cabang yang membagi aliran dari pipa utama menuju tiga titik injeksi berbeda: pangkal, tengah, dan ujung *gully*. Dengan sistem *bypass* ini, larutan hara yang telah dikoreksi nilai pH dan PPM-nya di tandon tidak hanya mengandalkan aliran tunggal dari hulu. Hal ini mencegah fenomena "kurang nutrisi" akibat penyerapan masif oleh akar di bagian depan, sehingga seluruh tanaman kale mendapatkan kualitas nutrisi yang seragam.

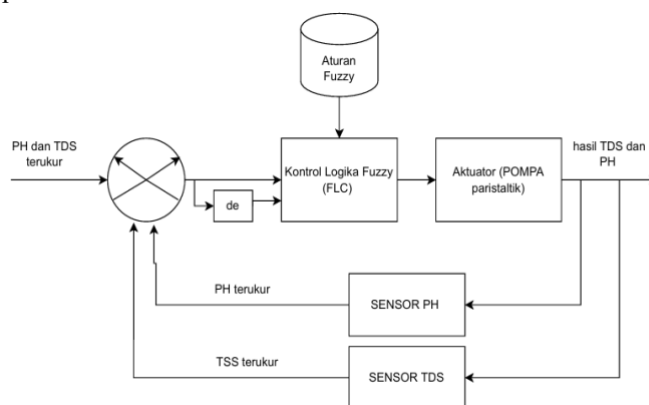
2.4 Implementasi Algoritma Logika Fuzzy

Menjaga kestabilan parameter nutrisi dan derajat keasaman (pH) pada sistem hidroponik NFT merupakan tantangan utama karena perubahan kondisi larutan terjadi secara dinamis akibat penyerapan unsur hara oleh tanaman, penguapan air, serta proses sirkulasi yang berlangsung secara kontinu. Penggunaan metode kendali konvensional berbasis ambang batas (*threshold*) atau *on-off* sering menghasilkan respon yang kurang halus sehingga berpotensi menimbulkan fluktuasi parameter yang besar dan fenomena *overshoot*. Kondisi tersebut dapat menyebabkan larutan nutrisi keluar dari rentang optimum dan berdampak pada terganggunya pertumbuhan tanaman kale.

Untuk mengatasi permasalahan tersebut, penelitian ini menerapkan *Fuzzy Logic Controller* (FLC) berbasis metode Mamdani yang mampu menangani karakteristik sistem yang bersifat nonlinier dan memiliki ketidakpastian tinggi. Pendekatan fuzzy dipilih karena mampu meniru cara pengambilan keputusan manusia dalam menentukan jumlah koreksi yang diperlukan berdasarkan kondisi aktual larutan nutrisi tanpa memerlukan model matematis yang kompleks. Dengan pendekatan ini, sistem dapat menghasilkan respon yang lebih adaptif dan bertahap dibandingkan metode kendali biner konvensional.

Variabel masukan (input) yang digunakan dalam sistem *fuzzy* terdiri atas error pH dan error PPM, yang diperoleh dari selisih antara nilai hasil pembacaan sensor dengan nilai *setpoint* yang telah ditentukan untuk kebutuhan pertumbuhan tanaman kale. Sementara itu, variabel keluaran (output) berupa durasi aktivasi pompa peristaltik yang digunakan untuk injeksi nutrisi A, nutrisi B, larutan pH *Up*, maupun pH *Down*. Masing-masing variabel input direpresentasikan ke dalam lima himpunan linguistik yaitu Sangat Rendah (SR), Rendah (R), Normal (N), Tinggi (T), dan Sangat Tinggi (ST). Adapun variabel *output* dibagi menjadi lima kategori linguistik yaitu Mati, Sangat Singkat, Singkat, Sedang, dan Lama.

Proses pengambilan keputusan dilakukan melalui tiga tahapan utama, yaitu *fuzzification*, *inference*, dan *defuzzification*. Pada tahap *fuzzification*, nilai error hasil pembacaan sensor dikonversi ke dalam derajat keanggotaan masing-masing himpunan linguistik. Selanjutnya, mesin inferensi (*inference engine*) menerapkan aturan *IF-THEN* yang telah dirancang berdasarkan kebutuhan nutrisi tanaman kale untuk menentukan respon kendali yang sesuai. Hasil inferensi kemudian dikonversi menjadi nilai numerik menggunakan metode *centroid* pada tahap *defuzzification* sehingga diperoleh durasi aktivasi pompa yang proporsional terhadap tingkat kesalahan yang terdeteksi. Mekanisme ini memungkinkan sistem melakukan koreksi secara bertahap saat parameter mendekati *setpoint* sehingga perubahan kondisi larutan berlangsung lebih stabil dan aman bagi sistem perakaran tanaman. Alur kerja penerapan algoritma *fuzzy* pada sistem yang dikembangkan ditunjukkan pada Gambar 7



Gambar 7 Flowchart Logika Fuzzy

Flowchart fuzzy pada gambar 7, menggambarkan proses pengambilan keputusan yang terdiri dari tiga tahap inti: *fuzzification*, *inference engine*, dan *defuzzification*. Input berupa nilai kesalahan pH dan PPM dipetakan ke dalam variabel linguistik menggunakan fungsi keanggotaan trapesium. Aturan *IF-THEN* kemudian menentukan durasi kerja pompa; misalnya, jika error pH "Sangat Tinggi", maka pompa pH *Down* akan aktif "Lama", namun durasinya akan berkurang secara otomatis seiring mengecilnya error menuju target. Aturan inferensi dirancang berdasarkan kebutuhan koreksi parameter pH dan PPM sehingga durasi aktivasi pompa meningkat seiring bertambahnya nilai error.

Tabel 2 Aturan Inferensi Fuzzy

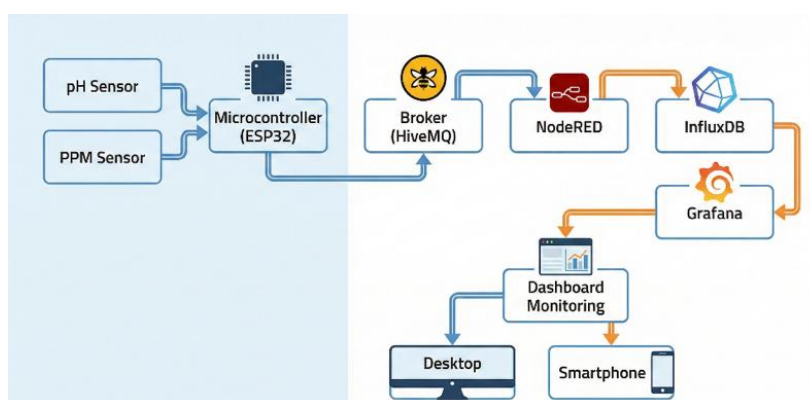
Kondisi Error pH/PPM	Durasi Aktivasi Pompa
Sangat Tinggi	Lama
Tinggi	Sedang
Normal	Mati

Rendah	Singkat
Sangat Rendah	Sangat Singkat

Tabel 2 menunjukkan aturan inferensi yang digunakan dalam *Fuzzy Logic Controller* (FLC). Aturan tersebut dirancang berdasarkan tingkat kesalahan (error) antara nilai aktual dan nilai *setpoint* pada parameter pH maupun PPM. Semakin besar nilai error yang terdeteksi, semakin lama durasi aktivasi pompa peristaltik yang diberikan sistem untuk melakukan koreksi. Sebaliknya, ketika nilai parameter mendekati *setpoint*, durasi aktivasi pompa akan dikurangi secara bertahap hingga kondisi stabil tercapai. Pendekatan ini memungkinkan proses pengendalian berlangsung lebih halus dan adaptif dibandingkan metode kendali berbasis ambang batas (*threshold control*).

2.5 Arsitektur Sistem IoT

Arsitektur *Internet of Things* (IoT) yang diterapkan mengadopsi model empat lapis untuk menjamin skalabilitas, keamanan data, dan stabilitas pengiriman informasi dari lapangan ke pengguna. Struktur berlapis ini memungkinkan integrasi yang mulus antara sensor fisik, protokol komunikasi, dan antarmuka visualisasi berbasis *cloud*.



Gambar 8 Arsitektur IoT

Gambar 8 merepresentasikan arsitektur komunikasi data *end-to-end* yang dirancang untuk menjamin kontinuitas aliran informasi dari perangkat keras di lapangan hingga antarmuka pengguna. Alur sistem dimulai dari lapisan akuisisi data, di mana sensor pH dan PPM mendeteksi parameter larutan dan dikonversi menjadi sinyal digital oleh mikrokontroler ESP32. Data tersebut kemudian ditransmisikan secara nirkabel menggunakan protokol ringan *MQTT* menuju *cloud broker* *HiveMQ*, yang selanjutnya diteruskan ke *NodeRED* untuk manajemen alur data (*flow management*). Untuk keperluan analisis historis dan visualisasi, data disimpan ke dalam basis data *time-series* *InfluxDB* dan diolah oleh *Grafana*, sehingga informasi kondisi tanaman dapat dipantau secara *real-time* dan interaktif melalui *dashboard* pada perangkat *desktop* maupun *smartphone*.

2.6 Formulasi Nutrisi dan Perhitungan Teknis

Dosis nutrisi ditentukan berdasarkan kebutuhan spesifik tanaman kale pada fase vegetatif. Berdasarkan referensi teknis, kale membutuhkan konsentrasi nutrisi antara 1,6 hingga 2,5 mS/cm atau setara dengan 1120 hingga 1750 PPM. Namun, untuk optimasi awal pada lingkungan Lampung, digunakan target 800-1000 PPM guna menghindari stres termal pada akar. Perhitungan dosis nutrisi menggunakan formulasi matematis sebagai berikut:

$$\text{Volume Nutrisi} = \frac{\text{Target PPM}}{\text{Standar PPM}} \times \text{Volume Standar}$$

Selain dosis nutrisi, dilakukan analisis beban kelistrikan untuk memastikan efisiensi energi. Total energi harian (E_{total}) dihitung dengan menjumlahkan konsumsi energi dari setiap komponen (E_n) yang merupakan perkalian antara daya (P_n) dengan waktu operasional (t_n):

$$E_{\text{total}} = \sum_{n=1}^N (P_n \times t_n) \quad (1)$$

Pengujian teknis dilakukan melalui kalibrasi sensor menggunakan larutan *buffer* standar (pH 4.0 dan 7.0) serta pengukuran manual debit pompa untuk memvalidasi presisi aktuasi. Seluruh rangkaian metode ini dirancang untuk menciptakan sistem yang tidak hanya cerdas secara perangkat lunak, tetapi juga kokoh secara mekanik dan efisien secara operasional.

3. Hasil Dan Pembahasan

Implementasi sistem otomasi hidroponik dengan mekanisme *bypass* ini telah memberikan data yang signifikan mengenai stabilitas kimiawi air, efisiensi energi, dan keseragaman distribusi nutrisi pada tanaman kale. Pembahasan berikut mengulas secara mendalam hasil pengujian teknis dan implikasi terhadap manajemen pertanian cerdas.

3.1 Evaluasi Akurasi dan Kalibrasi *Multi-Sensor*

Implementasi sistem kontrol tertutup dalam otomasi hidroponik sangat bergantung pada presisi instrumentasi yang digunakan sebagai input data primer. Keberhasilan menjaga stabilitas nutrisi dan derajat keasaman (pH) hanya dapat dicapai apabila sensor memiliki tingkat penyimpangan (*error*) yang minimal terhadap standar acuan. Oleh karena itu, tahap kalibrasi menjadi krusial untuk memastikan bahwa data yang dikirimkan ke mikrokontroler mencerminkan kondisi riil larutan di lapangan. Proses evaluasi dilakukan dengan membandingkan pembacaan sensor pH *internal* terhadap pH meter standar, serta melakukan standarisasi debit pada pompa peristaltik guna menjamin akurasi dosis nutrisi yang diberikan.

Tabel 3 Pengujian Kalibrasi pada Sensor pH

No	Sensor pH	pH Meter (Standar)	Error	Persentase Error
1	6.57	6.63	0.06	0.90%
2	7.01	6.74	0.27	4.01%
3	6.56	6.64	0.08	1.20%
4	6.79	6.57	0.22	3.35%
5	8.45	8.4	0.05	0.60%
Rata-rata			0.136	2.01%

Berdasarkan data hasil pengujian yang tersaji pada Tabel 2, dapat dianalisis bahwa sensor pH yang digunakan memiliki tingkat reliabilitas yang tinggi. Dari lima titik pengujian, rata-rata kesalahan pembacaan tercatat hanya sebesar 0,136 unit dengan persentase *error* akumulatif sebesar 2,01%. Meskipun terdapat fluktuasi *error* tertinggi pada pengujian kedua (4,01%), namun konsistensi pembacaan pada titik lainnya, seperti pada pengujian kelima yang hanya menunjukkan deviasi 0,60%, membuktikan bahwa sensor mampu beroperasi secara akurat dalam rentang pH basa maupun asam. Akurasi ini sangat memadai untuk kebutuhan tanaman hidroponik yang umumnya memerlukan toleransi perubahan pH di kisaran 0,5 hingga 1,0 unit.

Tabel 4 Pengujian Kalibrasi Pada Pompa Peristaltik

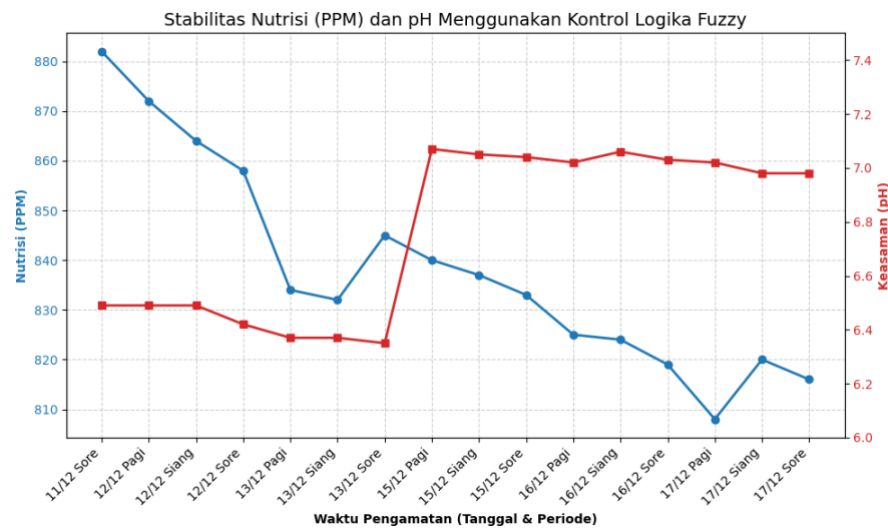
No	Nama Pompa	Durasi (Waktu)	Volume Cairan
1	Pompa Nutrisi A	1 Menit	50 ml
2	Pompa Nutrisi B	1 Menit	50 ml
3	Pompa pH Down	1 Menit	50 ml
4	Pompa pH Up	1 Menit	50 ml

Hasil pengujian pada Tabel 3 mengonfirmasi bahwa seluruh pompa peristaltik memiliki karakteristik debit yang konstan sebesar 50 ml per menit. Konsistensi ini sangat krusial agar fase injeksi nutrisi A dan B tetap seimbang, serta koreksi pH asam maupun basa tidak menyebabkan perubahan kimiawi yang terlalu drastis di dalam tandon utama. Hal ini membuktikan bahwa mekanisme aktuasi sistem telah terkalibrasi secara presisi untuk mendukung fase pertumbuhan vegetatif kale.

3.2 Analisis Stabilitas Nutrisi dan Performa Logika *Fuzzy*

Implementasi algoritma *Fuzzy Logic Controller* (FLC) pada sistem ini dirancang untuk memitigasi masalah ketidakstabilan parameter lingkungan yang kerap muncul pada sistem kendali konvensional berbasis ambang batas

(*threshold*). Dalam dinamika kimiawi hidroponik, respons aktuator yang bersifat biner (*on-off*) memiliki kelemahan utama berupa risiko *overshoot*, di mana injeksi nutrisi atau penstabil pH berlanjut melampaui titik target akibat keterlambatan respons sensor. Sebaliknya, mekanisme inferensi *fuzzy* bekerja dengan memetakan besaran *error* dan laju perubahan *error* untuk menghasilkan output PWM (*Pulse Width Modulation*) yang proporsional. Dengan pendekatan ini, sistem mampu melakukan "penggeraman" otomatis atau penurunan durasi pompa saat nilai parameter mendekati *setpoint*, menciptakan kurva respons yang landai dan mencegah perubahan kimia yang berpotensi mengganggu pertumbuhan akar tanaman kale.



Gambar 9 Grafik Tren Respons Stabilitas Konsentrasi Nutrisi Dan Ph Terhadap Waktu

Efektivitas penerapan logika tersebut divisualisasikan melalui Gambar 9 dan diperinci secara kuantitatif pada Tabel 4. Fluktuasi nilai nutrisi (PPM) dan derajat keasaman (pH) bergerak linear tanpa adanya lonjakan ekstrem yang tajam. Berdasarkan data tabel, sistem berhasil mempertahankan nutrisi pada rentang aman 808–882 PPM dan pH pada kisaran ideal 6,35–7,07 sepanjang periode pengujian. Kecerdasan sistem terlihat jelas pada kolom "Status Sistem", khususnya pada tanggal 15 Desember; saat sensor mendeteksi kenaikan pH hingga 7,07, FLC tidak merespons dengan injeksi asam yang agresif, melainkan menerapkan mekanisme "Penstabilan (*Decay*)" secara bertahap. Hal ini membuktikan bahwa sistem mampu menyeimbangkan kebutuhan koreksi parameter dengan keamanan fisiologis tanaman, sekaligus mengefisienkan konsumsi energi aktuator.

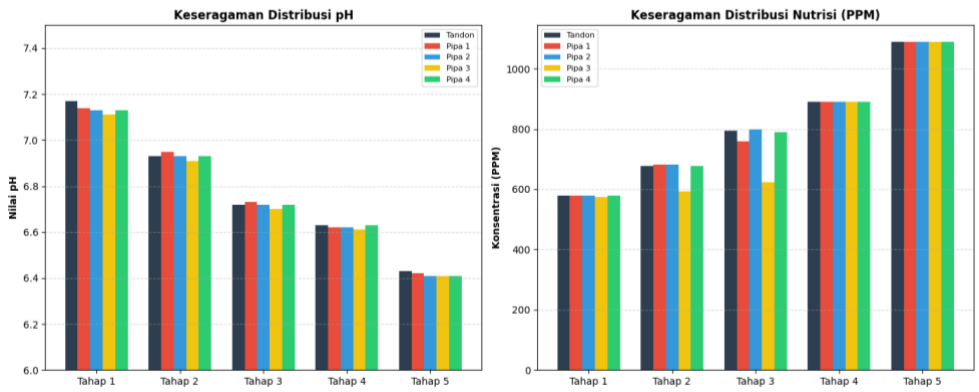
Tabel 5 Data Hasil Monitoring Stabilitas Nutrisi (PPM), Derajat Keasaman (Ph), Dan Respons Status Sistem

Tanggal	Periode Waktu	Ppm	Ph	Status Sistem (Respon FLC)
11/12/2025	Sore	882	6,49	Stabil (<i>Monitoring</i>)
12/12/2025	Pagi	872	6,49	Stabil (<i>Monitoring</i>)
	Siang	864	6,49	Stabil (<i>Monitoring</i>)
	Sore	858	6,42	Penyesuaian pH Halus
13/12/2025	Pagi	834	6,37	Koreksi Nutrisi (<i>Low Duty</i>)
	Siang	832	6,37	Stabil (<i>Monitoring</i>)
	Sore	845	6,35	Stabil (Target Tercapai)
15/12/2025	Pagi	840	7,07	Koreksi pH <i>Down</i> (<i>Active</i>)
	Siang	837	7,05	Penstabilan (<i>Decay</i>)
	Sore	833	7,04	Penstabilan (<i>Decay</i>)
16/12/2025	Pagi	825	7,02	Stabil (Ambang Batas)
	Siang	824	7,06	Koreksi pH Halus

17/12/2025	Sore	819	7,03	Stabil (<i>Monitoring</i>)
	Pagi	808	7,02	Koreksi Nutrisi (<i>Medium Duty</i>)
	Siang	820	6,98	Sistem Seimbang (<i>Balanced</i>)
	Sore	816	6,98	Stabil (<i>Monitoring</i>)

3.3 Efektivitas Mekanisme *Bypass* dalam Menciptakan Keceragaman Nutrisi

Tantangan dasar dalam sistem hidroponik *Nutrient Film Technique* (NFT) berskala besar adalah fenomena *gradien* nutrisi, di mana terjadi penurunan konsentrasi unsur hara dan perubahan pH yang signifikan antara tanaman di posisi *inlet* (pangkal) dan *outlet* (ujung). Ketimpangan ini umumnya disebabkan oleh aliran laminar yang lambat dan akumulasi endapan pada jalur distribusi panjang, yang berakibat pada pertumbuhan tanaman yang heterogen. Untuk mengeliminasi defisiensi spasial tersebut, penelitian ini menerapkan mekanisme *bypass* hidrolik yang berfungsi menstabilkan tekanan aliran dan menciptakan sirkulasi tertutup (*closed-loop circulation*). Mekanisme ini dirancang untuk memastikan bahwa setiap *gully* distribusi menerima suplai larutan yang telah terhomogenisasi sempurna di tandon utama, sehingga variabel jarak tanaman dari pompa tidak lagi menjadi faktor pembatas kualitas pertumbuhan.



Gambar 10 Evaluasi Homogenitas Distribusi Nutrisi Antar Pipa

Hasil uji beban bertingkat yang divisualisasikan pada Gambar 10 dan diperinci dalam Tabel 5. Pengujian dilakukan dalam lima tahap dengan memvariasikan larutan dari konsentrasi rendah ke tinggi untuk menguji linearitas distribusi sistem. Hasil pengukuran menunjukkan performa homogenitas yang sangat presisi, terutama pada Tahap 4 dan Tahap 5. Pada kondisi beban nutrisi maksimum (Tahap 5), sistem mencatatkan nilai PPM yang identik sebesar 1090 PPM di seluruh titik pengukuran mulai dari Tandon hingga Pipa 4 tanpa adanya deviasi (selisih 0). Konsistensi serupa juga terlihat pada stabilitas pH, di mana selisih nilai antara sumber (Tandon: 6,43) dan titik terjauh (Pipa 4: 6,41) sangat kecil ($< 0,02$). Data ini mengonfirmasi bahwa mekanisme *bypass* berhasil meniadakan *dead zone* aliran dan menunjukkan tingkat homogenitas distribusi nutrisi yang sangat tinggi, terlepas dari seberapa pekat konsentrasi larutan yang digunakan.

Tabel 6 Evaluasi Homogenitas Distribusi Nutrisi Dengan Parameter Selisih Dan Status Keceragaman

Pengujian Ke	Parameter	Tandon	Pipa 1	Pipa 2	Pipa 3	Pipa 4	Selisih	Status Distribusi
1	pH	7.17	7.14	7.13	7.11	7.13	0.06	Sangat Homogen
	PPM	578	578	578	573	578	5	Sangat Homogen
2	pH	6.93	6.95	6.93	6.91	6.93	0.04	Sangat Homogen
	PPM	678	682	682	592	678	90	Cukup Homogen
3	pH	6.72	6.73	6.72	6.7	6.72	0.03	Sangat Homogen
	PPM	793	759	798	624	790	174	Transisi (Stabilizing)

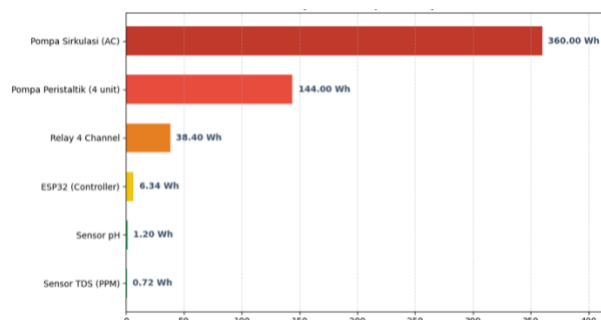
4	pH	6.63	6.62	6.62	6.61	6.63	0.02	Sangat Presisi
	PPM	891	891	891	891	891	0	Sempurna (Identik)
5	pH	6.43	6.42	6.41	6.41	6.41	0.02	Sangat Presisi
	PPM	1090	1090	1090	1090	1090	0	Sempurna (Identik)

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 5, mekanisme *bypass* menunjukkan kemampuan yang semakin baik dalam menghasilkan distribusi nutrisi yang seragam seiring meningkatnya kestabilan sistem. Deviasi konsentrasi nutrisi yang masih terlihat pada pengujian tahap 2 dan tahap 3, masing-masing sebesar 90 PPM dan 174 PPM, mengindikasikan bahwa proses homogenisasi larutan belum sepenuhnya tercapai pada fase transisi setelah penambahan nutrisi. Kondisi ini diduga disebabkan oleh waktu pencampuran dan sirkulasi larutan yang belum cukup untuk menghasilkan distribusi yang merata ke seluruh jalur NFT.

Namun, setelah sistem mencapai kondisi tunak pada tahap 4 dan tahap 5, seluruh titik pengukuran menunjukkan nilai PPM yang identik dengan selisih 0 PPM antar pipa, disertai variasi pH yang sangat kecil ($<0,02$). Hasil tersebut membuktikan bahwa mekanisme *bypass* mampu menghilangkan fenomena gradien nutrisi yang umum terjadi pada sistem NFT konvensional dan menghasilkan distribusi larutan yang homogen dari hulu hingga hilir. Temuan ini sejalan dengan penelitian A. R. Puerta yang menunjukkan bahwa modifikasi jalur distribusi dapat meningkatkan keseragaman pasokan nutrisi, namun penelitian ini memberikan kontribusi tambahan melalui integrasi mekanisme *bypass* dengan sistem monitoring IoT dan pengendalian otomatis sehingga stabilitas distribusi nutrisi dapat dipertahankan secara berkelanjutan. Untuk mengevaluasi tingkat keseragaman distribusi nutrisi, dihitung koefisien variasi (*Coefficient of Variation/CV*) antar titik pengukuran. Pada pengujian tahap 4 dan tahap 5 diperoleh nilai CV sebesar 0%, yang menunjukkan tidak adanya variasi konsentrasi nutrisi antar pipa sehingga distribusi nutrisi dapat dikategorikan sangat homogen.

3.4 Analisis Konsumsi Energi dan Efisiensi Operasional

Dalam pengembangan sistem pertanian presisi berbasis *Internet of Things (IoT)*, efisiensi energi merupakan indikator kinerja utama yang menentukan kelayakan ekonomi implementasi alat dalam jangka panjang. Sistem otomatisasi yang ideal harus mampu menjalankan fungsi monitoring dan pengendalian kompleks dengan konsumsi daya seminimal mungkin, sehingga tidak membebani biaya operasional harian petani. Untuk memvalidasi efisiensi tersebut, penelitian ini melakukan audit energi dengan mengkalkulasi total daya (*Watt*) dan estimasi energi harian (*Watt-hour*) dari enam komponen aktif utama, yang mencakup unit mikrokontroler, sensor, relay, hingga aktuator pompa. Perhitungan didasarkan pada spesifikasi teknis komponen dan durasi operasional rata-rata dalam satu siklus harian penuh (24 jam).



Gambar 11 Distribusi Konsumsi Energi

Pada Gambar 11 menunjukkan bahwa sistem ini memiliki profil konsumsi daya yang sangat efisien dan Hasil audit energi yang dirincikan pada Tabel 6. Total energi yang dibutuhkan sistem untuk beroperasi penuh selama satu hari hanya sebesar 550,656 Wh (atau sekitar 0,55 kWh). Analisis distribusi beban memperlihatkan bahwa konsumsi energi terbesar didominasi oleh Pompa Sirkulasi (AC) sebesar 360 Wh/hari, yang merupakan kebutuhan mutlak dalam sistem NFT untuk menjaga aliran nutrisi. Sementara itu, komponen cerdas (ESP32 dan Sensor) hanya mengonsumsi daya yang sangat tidak signifikan (< 10 Wh gabungan), dan aktuatur koreksi (Pompa Peristaltik) bekerja secara efisien (144 Wh) berkat penerapan algoritma *Fuzzy Logic* yang membatasi durasi aktifnya. Dengan total konsumsi di bawah 1 kWh per hari, sistem ini terbukti hemat energi dan sangat layak diterapkan pada skala rumahan maupun industri kecil.

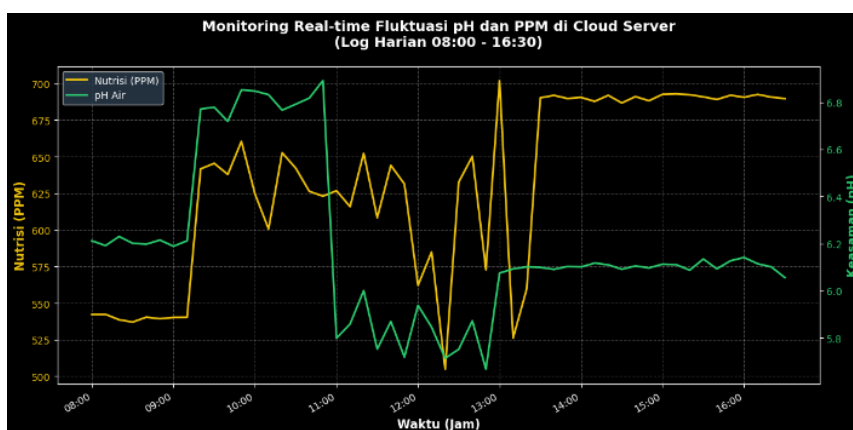
Tabel 7 Konsumsi Energi

No	Komponen Elektronika	Arus (A)	Tegangan (V)	Daya (W)	Energi (Wh/hari)
----	----------------------	----------	--------------	----------	------------------

1	Pompa Peristaltik (4 unit)	1.2	5	6	144
2	Relay 4 Channel	0.32	5	1.6	38.4
3	Sensor pH	0.01	5	0.05	1.2
4	Sensor TDS (PPM)	0.006	5	0.03	0.72
5	ESP32 (Controller)	0.08	3.3	0.264	6.336
6	Pompa Sirkulasi (AC)	0.068	220	15	360
TOTAL		1,684 A	-	22,944 W	550,656 Wh

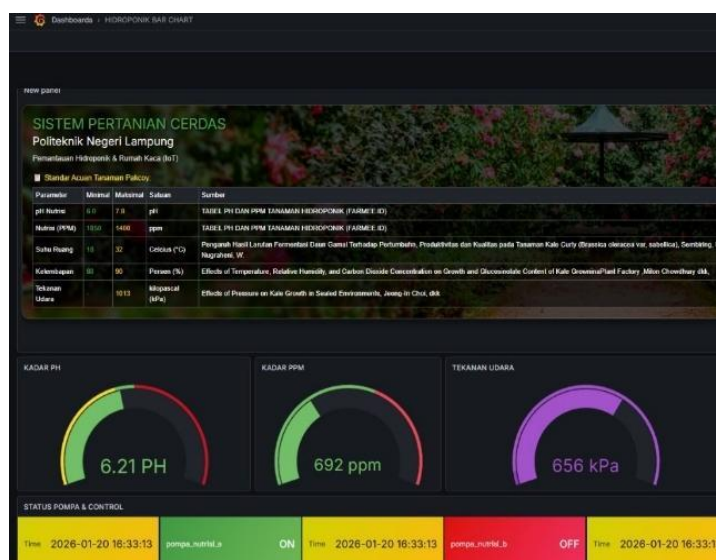
3.5 Keandalan Komunikasi *IoT* dan Manajemen Data *Cloud*

Keandalan infrastruktur *Internet of Things* (IoT) dalam pertanian presisi tidak hanya diukur dari konektivitas perangkat, tetapi juga dari integritas data yang dikirimkan secara *real-time* ke platform *cloud*. Tantangan utama dalam telemetri nirkabel adalah potensi *packet loss* dan latensi yang dapat menyebabkan hilangnya informasi krusial saat terjadi fluktuasi parameter lingkungan yang cepat. Oleh karena itu, sistem manajemen data *cloud* harus memiliki kemampuan *sampling rate* yang tinggi untuk merekam jejak dinamis dari perubahan kadar nutrisi dan pH, sehingga data yang tersaji pada *dashboard* pengguna merupakan representasi akurat dari kondisi fisik aktual di lapangan, bukan sekadar nilai rata-rata yang digeneralisasi.



Gambar 12 Grafik *Monitoring Real-time*

Keandalan komunikasi sistem ini ditunjukkan pada Gambar 12. Grafik tersebut merekam respons dinamis parameter PPM (Garis Kuning) dan pH (Garis Hijau) dalam rentang waktu operasional dari pukul 08:15 hingga 16:30. Terlihat jelas bahwa sistem *IoT* mampu menangkap momen krusial "lonjakan nutrisi" pada pukul 09:15, di mana nilai PPM naik drastis dari 540 ke 650 akibat aktivitas *dosing*, yang diikuti oleh fluktuasi sementara sebelum mencapai titik stabil. Kemampuan sistem untuk memvisualisasikan "noise" atau gelombang kecil pada grafik membuktikan bahwa pengiriman data terjadi dengan interval yang sangat rapat (presisi tinggi) tanpa adanya *delay* yang berarti. Selain itu, visualisasi pada antarmuka *dashboard* memperlihatkan bahwa data tersebut berhasil diolah dan ditampilkan dalam format grafis yang mudah dipahami, mengonfirmasi bahwa jalur komunikasi dari sensor (*Edge*) ke server (*Cloud*) berjalan stabil dalam menangani trafik data pH dan PPM secara simultan.



Gambar 13 Dashboard Monitoring

4. Kesimpulan Dan Saran

Penelitian ini berhasil mengatasi permasalahan gradien nutrisi pada sistem hidroponik NFT melalui integrasi mekanisme *bypass* distribusi, kontrol logika *fuzzy*, dan monitoring berbasis IoT. Hasil pengujian menunjukkan bahwa mekanisme *bypass* mampu menghasilkan distribusi nutrisi yang sangat homogen dengan selisih konsentrasi 0 PPM pada pengujian tahap 4 dan 5 antara tandon hingga pipa ke-4. Sistem juga mampu mempertahankan kestabilan nutrisi pada rentang 808–882 PPM dan pH pada rentang 6,35–7,07 selama periode pengujian. Hasil kalibrasi sensor pH menunjukkan rata-rata persentase kesalahan sebesar 2,01%, yang mengindikasikan tingkat akurasi sensor yang baik untuk aplikasi hidroponik presisi. Selain itu, konsumsi energi total sistem tercatat sebesar 550,656 Wh/hari sehingga sistem dinilai efisien untuk implementasi budidaya hidroponik skala rumah tangga maupun skala kecil-menengah.

Selain stabilitas fisik, integrasi kendali cerdas *Fuzzy Logic* dan konektivitas IoT menjadi kunci presisi sistem ini. Algoritma *fuzzy* terbukti mampu meredam fluktuasi parameter lingkungan secara responsif dan hemat energi (550,66 Wh/hari), sementara arsitektur IoT menjamin integritas pengiriman data dari sensor ke *cloud* tanpa *packet loss* yang berarti. Keandalan ini memungkinkan pengguna memantau dinamika pH dan PPM serta kondisi mikroklimat secara *real-time* melalui dashboard antarmuka jarak jauh, memastikan keputusan perawatan tanaman Kale dapat dilakukan kapan saja tanpa batasan lokasi. Sinergi antara mekanikal *bypass*, kecerdasan kontrol, dan visibilitas data IoT menjadikan sistem ini solusi komprehensif untuk modernisasi pertanian presisi.

Pengembangan penelitian selanjutnya sebaiknya dilakukan dalam ukuran budidaya yang lebih besar dan waktu tanam yang lebih lama untuk menilai seberapa konsisten performa mekanisme *bypass* dan kekuatan kontrol *Fuzzy Logic* saat menghadapi lingkungan yang lebih rumit. Penambahan variabel pemantauan seperti suhu larutan nutrisi, oksigen terlarut, serta sensor aliran juga dapat meningkatkan ketepatan pengendalian dan kualitas analisis kondisi sistem secara keseluruhan. Di samping itu, penerapan metode pengendalian adaptif atau teknik berbasis pembelajaran mesin dapat dipikirkan untuk meningkatkan kemampuan prediksi dan efisiensi sistem dalam menangani variasi kebutuhan nutrisi. Dari segi pelaksanaan, penguatan elemen keamanan dan redundansi sistem IoT menjadi krusial untuk memastikan keandalan komunikasi data pada tingkat industri.

Daftar Pustaka

- [1] E. Fathidarehnejeh, M. Nadeem, M. Cheema, R. Thomas, M. Krishnapillai, and L. Galagedara, "Current perspective on nutrient solution management strategies to improve the nutrient and water use efficiency in hydroponic systems," *Can. J. Plant Sci.*, vol. 104, no. 2, pp. 88–102, 2024, doi: 10.1139/cjps-2023-0034.
- [2] O. D. Palmitessa, A. Signore, and P. Santamaria, "Advancements and future perspectives in nutrient film technique hydroponic system: a comprehensive review and bibliometric analysis," *Front. Plant Sci.*, vol. 15, no. December, pp. 1–21, 2024, doi: 10.3389/fpls.2024.1504792.
- [3] R. Herrera-Arroyo, J. Martínez-Nolasco, E. Botello-Álvarez, V. Sámano-Ortega, C. Martínez-Nolasco, and C. Moreno-Aguilera, "Smart Hydroponic Cultivation System for Lettuce (*Lactuca sativa* L.) Growth Under Different Nutrient Solution Concentrations in a Controlled Environment," *Appl. Syst. Innov.*, vol. 8, no. 4, pp. 1–27, 2025, doi: 10.3390/asi8040110.

- [4] I. I. J. Rifka Alkhilyatul Ma'rifat, I Made Suraharta, "SISTEM HIDROPONIK MENGGUNAKAN NUTRIENT FILM TECHNIQUE UNTUK PRODUKSI DAN HASIL TANAMAN SELADA (*Lactuca sativa* L.)," vol. 2, no. 11, pp. 306–312, 2024.
- [5] J. C. Escalante-Mamani *et al.*, "Design and Validation of an IoT-Integrated Fuzzy Logic Controller for High-Altitude NFT Hydroponic Systems: A Case Study in Cusco, Peru," *Electron.*, vol. 14, no. 18, pp. 1–29, 2025, doi: 10.3390/electronics14183740.
- [6] A. R. Puerta, S. Sato, Y. Shinohara, and T. Maruo, "A modified nutrient film technique system offers a more uniform nutrient supply to plants," *Horttechnology*, vol. 17, no. 2, pp. 227–233, 2007, doi: 10.21273/horttech.17.2.227.
- [7] C. L. Candra, W. S. D. Yamika, and R. Soelistyono, "Pengaruh Debit Aliran Nutrisi dan Jenis Media Tanam terhadap Pertumbuhan dan Hasil Tanaman Kale (*Brassica oleracea* var. *acephala*) pada Sistem Hidroponik Nutrient Film Technique (NFT)," *J. Produksi Tanam.*, vol. 8, no. 2, pp. 8–15, 2020.
- [8] H. Sulaiman, A. A. Yusof, and M. K. Mohamed Nor, "Automated Hydroponic Nutrient Dosing System: A Scoping Review of pH and Electrical Conductivity Dosing Frameworks," *AgriEngineering*, vol. 7, no. 2, pp. 1–23, 2025, doi: 10.3390/agriengineering7020043.
- [9] S. E. Wortman, "Crop physiological response to nutrient solution electrical conductivity and pH in an ebb-and-flow hydroponic system," *Sci. Hortic. (Amsterdam)*, vol. 194, pp. 34–42, 2015, doi: 10.1016/j.scienta.2015.07.045.
- [10] T. Yang, U. Samarakoon, and J. Altland, "Modified nutrient management protocol for optimum biomass production, nutritional quality, and flavor-related phytochemical properties of hydroponic-grown kale (*Brassica oleracea*)," *Front. Plant Sci.*, vol. 16, no. August, pp. 1–16, 2025, doi: 10.3389/fpls.2025.1629432.
- [11] M. R. E. Prasetyoaji and L. Anifah, "Design of Smart Hydroponics Based on Internet of Things (IoT) Using Rule-Based System on Hydroponic Wick System," *J. FORTEI-JEERI*, vol. 6, no. 1, pp. 51–62, 2025, doi: 10.46962/forteijeeri.v6i1.34.
- [12] B. Kusumo and N. Azis, "Rancang Bangun Alat Penyiram Sayuran Hidroponik Menggunakan Arduino Mega 2560," *J. Media Inform. Budidarma*, vol. 5, no. 1, p. 124, 2021, doi: 10.30865/mib.v5i1.2584.
- [13] T. Demir and İ. Çiçek, "A Low-Cost and Reliable IoT-Based NFT Hydroponics System Using ESP32 and MING Stack," p. 3, 2026, doi: 10.3390/engproc2026122003.
- [14] N. Kathpal, S. Gola, S. Mishra, and K. Dakshayini, "Implementation of Smart Hydroponic Farming Using AI Controller with Mobile Application System," no. May, pp. 3–9, 2025, doi: 10.21467/proceedings.7.6.
- [15] U. Umar, "Pengembangan Sistem Kendali Kuantitas Air Pada Tanaman Hidroponik Berbasis Internet of Thing (IoT)," *Multinetics*, vol. 6, no. 2, pp. 110–116, 2020, doi: 10.32722/multinetics.v6i2.3447.