

Sistem Pengontrolan Nutrisi Hidroponik untuk Tanaman Mentimun Berbasis Logika Fuzzy dan IoT

¹Nunu Nugraha, ²Panji Novantara
¹Fakultas Ilmu Komputer Universitas Kuningan
E-mail: Nunu.nugraha@uniku.ac.id

² Fakultas Ilmu Komputer Universitas Kuningan
E-mail: panji@uniku.ac.id

*Penulis Korespondensi

Abstrak— Hidroponik telah menjadi metode pertanian yang semakin populer karena kemampuannya untuk menghasilkan tanaman dengan efisiensi penggunaan lahan dan air yang lebih baik. Namun, pengelolaan nutrisi dalam sistem hidroponik sering kali menjadi tantangan, karena membutuhkan pemantauan dan pengendalian yang akurat untuk memastikan pertumbuhan tanaman yang optimal. Penelitian ini mengembangkan sistem pengontrolan nutrisi hidroponik berbasis logika fuzzy dan Internet of Things (IoT) untuk meningkatkan efisiensi pemberian nutrisi dalam budidaya hidroponik. Sistem ini menggunakan metode Nutrient Film Technique (NFT) dengan mikrokontroler Arduino dan NodeMCU ESP32 yang terhubung dengan sensor TDS, DS18B20, dan sensor ultrasonik. Input sistem terdiri dari nilai nutrisi dan ketinggian air dalam tandon, sementara outputnya mengontrol durasi operasi pompa nutrisi dan air. Data sensor diproses dan dikirim ke penyimpanan cloud melalui ESP32, memungkinkan pemantauan real-time melalui aplikasi Android. Hasil pengujian menunjukkan efektivitas sistem dalam menjaga tingkat nutrisi optimal selama fase pertumbuhan awal tanaman. Sensor TDS memiliki akurasi 98,19%, sementara sensor ultrasonik mencapai akurasi 98,78%. Implementasi IoT memungkinkan pemantauan jarak jauh dan pengambilan keputusan berbasis data secara real-time. Dengan sistem otomatis ini, petani dapat mengoptimalkan produksi tanpa perlu pemantauan manual yang intensif. Teknologi ini memberikan solusi inovatif dalam pertanian presisi, meningkatkan efisiensi sumber daya, serta mendukung keberlanjutan dan produktivitas tanaman hidroponik.

Kata Kunci — Hidroponik, IoT, Fuzzy, Nutrisi, DFT

Abstract— Hydroponics has become an increasingly popular farming method due to its ability to produce crops with better land and water use efficiency. However, nutrient management in hydroponic systems is often challenging as it requires accurate monitoring and control to ensure optimal plant growth. This research develops a fuzzy logic and Internet of Things (IoT)--based hydroponic nutrient control system to improve the efficiency of nutrient delivery in hydroponic cultivation. The system uses the Nutrient Film Technique (NFT) method with an Arduino microcontroller and NodeMCU ESP32 connected with a TDS sensor, DS18B20 and ultrasonic sensor. The system inputs consist of nutrient levels and water levels in the reservoir, while the outputs control the operation time of the nutrient and water pumps. Sensor data is processed and sent to cloud storage via the ESP32, allowing real-time monitoring via an Android app. Test results show the effectiveness of the system in maintaining optimal nutrient levels during the early growth stages of the plants. The TDS sensor had an accuracy of 98.19%, while the ultrasonic sensor had an accuracy of 98.78%. The IoT implementation enables remote monitoring and real-time data-driven decision-making. With this automated system, farmers can optimise production without intensive manual monitoring. This technology provides innovative solutions in precision agriculture, improves resource efficiency, and supports the sustainability and productivity of hydroponic crops.

Keywords — Hydroponics, IoT, Fuzzy, Nutrition, DFT

I. PENDAHULUAN

Pertanian pintar (*smart farming*) dengan kecerdasan buatan menjadi solusi efisien untuk mengatasi tantangan keberlanjutan pertanian saat ini. Untuk mencapai tujuan ini, teknologi seperti pembelajaran mesin, deep learning, dan analisis seri waktu sangat dibutuhkan dalam pertanian pintar [1]. Dalam upaya memenuhi tantangan ini, teknologi modern seperti *Internet of Things* (IoT), kecerdasan buatan, digital twin, dan lainnya semakin banyak diterapkan dalam lingkungan pertanian [2]. *Internet of Things* (IoT) adalah sebuah konsep yang dirancang untuk memperluas manfaat konektivitas internet dengan memastikan perangkat tetap terhubung secara terus-menerus [3]–[6]. IoT, sebagai salah satu teknologi modern, mendorong arah penelitian baru dalam pertanian dan digunakan untuk menghubungkan berbagai perangkat dalam lapisan yang berbeda [7]. Sistem pemantauan pertumbuhan

tanaman berbasis IoT pada lingkungan terkendali dan tidak terkendali untuk pertanian hidroponik di dalam ruangan menunjukkan temuan menarik. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa sistem pemantauan pertumbuhan tanaman berbasis IoT pada lingkungan terkendali menghasilkan kinerja yang lebih baik dibandingkan dengan sistem yang tidak terkendali [8].

Smart farming adalah konsep yang melibatkan (pemanfaatan teknologi mutakhir, seperti Kecerdasan Buatan (AI) dan *Internet of Things* (IoT), untuk meningkatkan efisiensi praktik pertanian [9]. Salah satu area dimana smart farming dapat diterapkan adalah pada pertanian hidroponik, yang melibatkan penanaman tanaman dalam larutan air yang kaya nutrisi tanpa tanah [10]. Dalam konteks ini, sebuah simulasi model *hybrid AI-IoT* dapat dikembangkan untuk mengoptimalkan nutrisi tanaman hidroponik. Model dapat menggunakan algoritma AI untuk menganalisis data yang dikumpulkan dari perangkat IoT seperti sensor dan kamera untuk menentukan komposisi nutrisi optimal untuk tanaman. Sistem hidroponik cerdas menggunakan teknologi IoT dan AI untuk meningkatkan hasil panen dan efisiensi penggunaan nutrisi dan air pada pertanian hidroponik.

Metode hidroponik, ditingkatkan oleh sistem logika *fuzzy*, secara signifikan mengoptimalkan pengelolaan nutrisi dan irigasi dipertanian modern. *Fuzzy logic* menyediakan kerangka kerja yang kuat untuk mengotomatiskan kontrol pH dan tingkat nutrisi, memastikan kondisi optimal untuk pertumbuhan tanaman. Penerapan metode fuzzy dalam sistem pengendalian otomatis kepekatan nutrisi untuk tanaman hidroponik berbasis mikrokontroler pada sistem *Nutrient Film Technique* (NFT) merupakan topik yang menarik dan inovatif. Sistem ini bertujuan untuk mempermudah petani dalam mengatur campuran nutrisi AB mix + POC dengan air pada nilai PPM yang sesuai dengan usia pertumbuhan tanaman, seperti selada, secara otomatis [11]. Efisiensi pencampuran nutrisi: penerapan logika *fuzzy* pada mesin pencampur nutrisi telah terbukti menghemat hingga 78% dalam tenaga kerja dan 42,86% dalam penggunaan nutrisi dibandingkan dengan metode manual [12]. Metode hidroponik menggunakan kontrol logika *fuzzy* multistep untuk pengaturan parameter, mencapai kondisi air yang optimal untuk tanaman kangkung melalui kalibrasi berulang dan aktivasi relay [13]. Pertanian cerdas menggunakan logika fuzzy menawarkan manfaat signifikan dalam mengatasi tantangan pertanian. Dengan memanfaatkan sistem *fuzzy*, petani dapat membuat keputusan berdasarkan informasi meskipun ada ketidakpastian dalam kondisi lingkungan dan pengelolaan tanaman. Selain itu, logika *fuzzy* membantu dalam merencanakan infrastruktur komunikasi IoT, meningkatkan pertukaran data antar perangkat untuk alokasi sumber daya yang lebih baik [14].

Kelebihan nutrisi ppm dalam hidroponik dapat secara signifikan mempengaruhi pertumbuhan tanaman dan komposisi nutrisi. Kandungan unsur hara dalam hidroponik berperan penting meningkatkan pertumbuhan tanaman diantaranya jumlah daun, lebar dan panjang [11]. Sementara tingkat nutrisi yang memadai sangat penting untuk pertumbuhan yang optimal, konsentrasi yang berlebihan dapat menyebabkan efek merugikan pada kesehatan tanaman dan penyerapan nutrisi. Konsentrasi nutrisi yang tinggi dapat menghambat pertumbuhan tanaman [15], Fluktuasi konsentrasi nutrisi dapat mempengaruhi efisiensi penyerapan. Misalnya, tanaman mentimun menunjukkan penurunan kadar nitrogen di bawah kondisi CO₂ yang meningkat, diperburuk oleh ketidakseimbangan larutan nutrisi [16].

Pemantauan dan penyesuaian tingkat nutrisi yang cermat sangat penting untuk memaksimalkan efisiensi sistem hidroponik. Penggunaan nutrisi berbasis *Parts Per Million* (PPM) dalam hidroponik dapat secara signifikan meningkatkan pertumbuhan tanaman dengan memastikan ketersediaan dan pengelolaan nutrisi yang optimal. Metode ini memungkinkan kontrol yang tepat atas konsentrasi nutrisi, yang sangat penting untuk memaksimalkan hasil dan kualitas tanaman. Hidroponik memerlukan penanganan khusus untuk memastikan kadar nutrisi tetap dalam rentang optimal, sehingga penerapan sistem kendali dapat memfasilitasi pemantauan dan penyesuaiannya [17]. Selain itu, sistem berbasis *Internet of Things* (IoT) dapat mengotomatiskan pengiriman nutrisi, memastikan bahwa tanaman menerima nutrisi yang diperlukan tanpa intervensi manual, sehingga mencegah kekurangan yang dapat menghambat pertumbuhan. Tantangannya adalah bagaimana menghubungkan beberapa sensor berbiaya rendah ke dalam mikrokontroler dan ke alat yang ada dipasaran [18].

Penelitian ini mengusulkan sistem pemantauan dan pengendalian otomatis nutrisi hidroponik berbasis IoT menggunakan metode *fuzzy logic* dengan parameter input berupa nilai PPM nutrisi dan ketinggian air pada tandon nutrisi. Parameter-parameter ini digunakan dalam *fuzzy logic* untuk mengaktifkan pompa nutrisi dan pompa air yang dimasukkan ke dalam tandon nutrisi, kemudian

disirkulasikan pada media hidroponik. Implementasi penelitian ini dilakukan pada sistem hidroponik *Deep Flow Technique* (DFT).

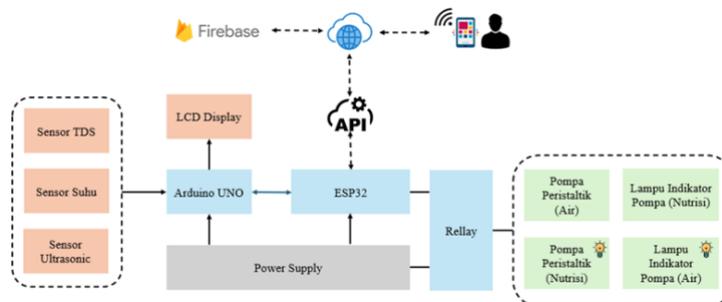
II. METODE PENELITIAN

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan dan menguji sistem pemantauan serta sistem kontrol nutrisi hidroponik berbasis logika *fuzzy* dan IoT. Sistem pemantauan mencakup pemantauan lingkungan dan ketinggian air, sedangkan sistem kontrol berfungsi untuk menjaga kestabilan nutrisi dalam media hidroponik. Gambar 1 menyajikan diagram alur kerja sistem secara keseluruhan. Penelitian ini mencakup pengembangan perangkat keras dan perangkat lunak, serta pengujian sistem dalam berbagai kondisi untuk menjamin keandalannya..

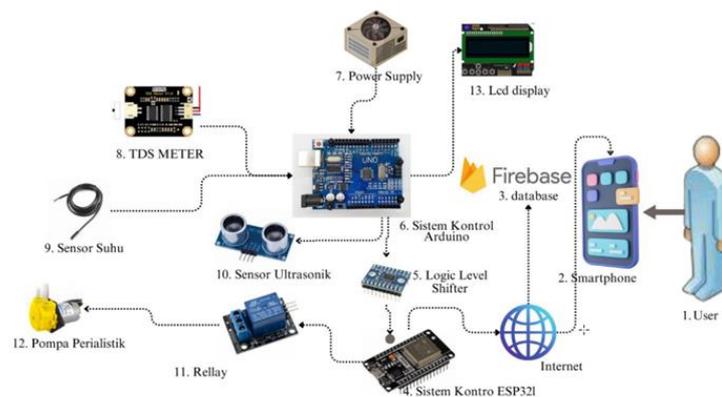
Perancangan Perangkat Pengontrolan

Perangkat keras yang digunakan mencakup mikrokontroler Arduino Uno dan NodeMCU ESP32, sensor TDS DFRobot Analog TDS Sensor Meter, sensor ultrasonik HC-SR04, dan sensor suhu DS18B20. Selain itu, pompa peristaltik digunakan untuk menyalurkan larutan nutrisi, sementara relay low trigger berfungsi mengontrol pompa. Data sensor ditampilkan melalui LCD Keypad Shield 16x2 untuk mempermudah pemantauan lokal. Gambar 2 menampilkan diagram komponen elektronik perangkat. Perangkat lunak yang diterapkan dalam penelitian ini memanfaatkan Arduino IDE untuk pemrograman, platform IoT untuk penyimpanan dan pemantauan data di cloud, serta aplikasi Android untuk pemantauan secara real-time.

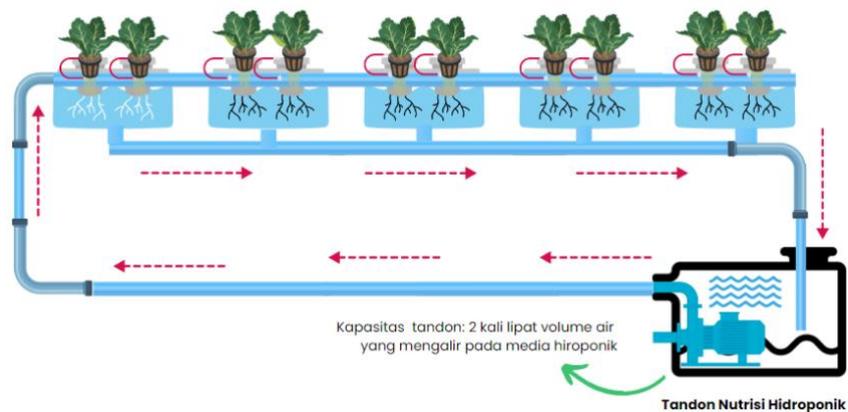
Sebagai penjelasan dari Gambar 2, sistem ini menggunakan sensor TDS dan sensor ultrasonik untuk mengukur konsentrasi nutrisi dan level air dalam sistem hidroponik. Data dari sensor-sensor ini dikirim ke NodeMCU ESP32, dimana logika *fuzzy* memproses informasi untuk mengatur operasi pompa nutrisi dan pompa air, menjaga keseimbangan nutrisi dan air. Proses *fuzzy* berjalan di mikrokontroler ESP32. Sistem ini juga dilengkapi dengan sensor suhu untuk memberikan informasi lingkungan tambahan melalui aplikasi android, meskipun tidak mempengaruhi kendali. Semua data dan status sistem dikirim ke *cloud* untuk pemantauan *real-time*, memungkinkan pengelolaan sistem secara jarak jauh.



Gambar 1. Arsitektur Sistem Pemantauan dan Pengontrolan Hidroponik Menggunakan IoT



Gambar 2. Diagram Komponen Elektronik Perangkat Pemantau



Gambar 3. Desain Implementasi Hidroponik Sistem DFT

Perancangan Hidroponik Sistem DFT

DFT atau *Deep Flow Technique* merupakan salah satu sistem tanam hidroponik yang memanfaatkan genangan dalam instalasi dan menggunakan sirkulasi dengan aliran lambat [19]. Sistem ini memanfaatkan listrik untuk menggerakkan pompa, sehingga nutrisi dapat dengan mudah disirkulasikan ke seluruh akar tanaman. Sistem hidroponik yang dibuat terdiri dari 5 pot, dengan setiap pot menampung 2 pohon. Rancangan desain DFT ditampilkan secara detail pada Gambar 3. Sirkulasi nutrisi dilakukan melalui pipa yang menghubungkan tandon nutrisi dengan setiap pot, dan tinggi genangan air dalam pot dipertahankan pada kisaran 4-5 cm.

Perancangan Pengontrolan Sistem

Penelitian ini menerapkan logika *fuzzy* sebagai sistem pintar untuk pengambilan keputusan terkait durasi operasi pompa nutrisi dan pompa air dalam sistem hidroponik. Dengan menggunakan variabel input berupa kadar nutrisi (PPM) dan level air pada tandon, sistem ini menentukan lamanya operasi pompa berdasarkan kondisi lingkungan. Jika kadar nutrisi di bawah ambang batas, pompa nutrisi diaktifkan lebih lama untuk menyeimbangkan konsentrasi nutrisi. Sebaliknya, jika level air di tandon terlalu rendah, pompa air bersih diaktifkan untuk menambah volume air. Pendekatan ini memungkinkan sistem untuk secara otomatis menyesuaikan kondisi hidroponik, memastikan pertumbuhan tanaman yang optimal. Logika *fuzzy* memungkinkan penyesuaian yang lebih halus dan responsif terhadap perubahan kondisi, dibandingkan dengan sistem kontrol konvensional. Logika *Fuzzy* memiliki tiga tahap utama: *fuzzifikasi*, *inferensi* dan *defuzzifikasi* [20].

Fuzzifikasi

Fuzzifikasi merupakan langkah awal dalam logika *fuzzy* yang berfungsi untuk menerjemahkan input data dari sensor ke dalam himpunan *fuzzy* dengan menentukan nilai derajat keanggotaan. Fungsi keanggotaan dibangun untuk setiap variabel *fuzzy*. Pada perancangan kontrol *fuzzy* terdapat 2 variabel input dan 2 variabel output. Variabel input yaitu nutrisi (ppm) dan ketinggian air. Sedangkan variabel output yaitu durasi pompa nutrisi dan durasi pompa air.

(a) Variabel Nutrisi

Variabel *fuzzy* untuk nutrisi dibagi menjadi tiga himpunan *fuzzy*: Rendah, Normal, dan Tinggi, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4. Fungsi keanggotaan untuk masing-masing himpunan tersebut ditentukan menggunakan persamaan (1), (2), dan (3) sebagai berikut:

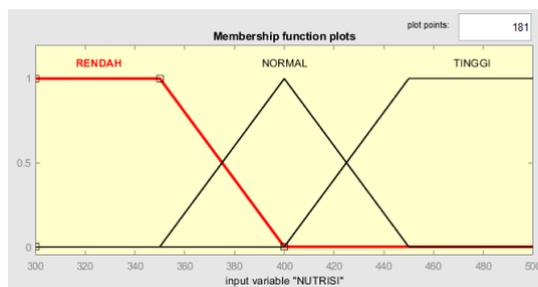
$$\mu_{Rendah}(x) = \begin{cases} 1; & \text{Jika } x \leq 350 \\ \frac{400-x}{400-350}; & \text{Jika } 350 < x \leq 400 \\ 0; & \text{Jika } x > 400 \end{cases} \quad (1)$$

$$\mu_{Normal}(x) = \begin{cases} 0; & \text{Jika } x \leq 350 \text{ atau } x > 450 \\ \frac{x-350}{400-350}; & \text{Jika } 300 < x \leq 350 \\ \frac{450-x}{450-400}; & \text{Jika } 400 < x \leq 450 \end{cases} \quad (2)$$

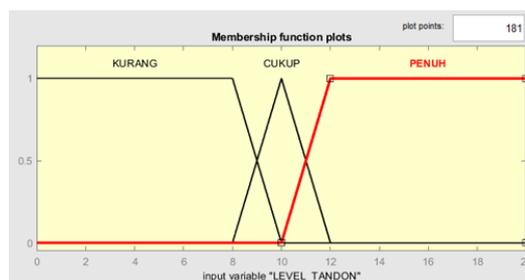
$$\mu_{Tinggi}(x) = \begin{cases} 0; & \text{Jika } x \leq 400 \\ \frac{x-400}{450-400}; & \text{Jika } 400 < x \leq 450 \\ 1; & \text{Jika } x \geq 450 \end{cases} \quad (3)$$

(b) Variabel Ketinggian Air

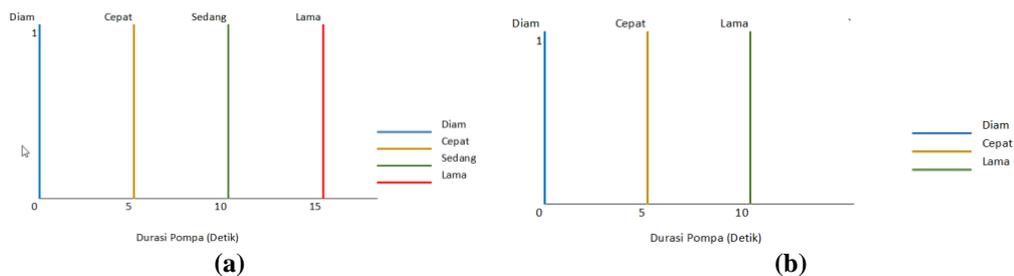
Variabel *fuzzy* untuk ketinggian air dibagi menjadi tiga himpunan *fuzzy logic*: Kurang, Cukup, dan Penuh, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 4. Fungsi Keanggotaan Variabel Nutrisi



Gambar 5. Fungsi Keanggotaan Variabel Ketinggian Air



Gambar 6. Fungsi Keanggotaan Output (a) Durasi Pompa Nutrisi (b) Durasi Pompa Air

Tabel 1. Basis Aturan Logika Fuzzy

No	Masukan		Luaran	
	Nutrisi	Level Tandon	Pompa Nutrisi	Pompa Air
1	RENDAH	KURANG	LAMA	LAMA
2	RENDAH	CUKUP	LAMA	SEDANG
3	RENDAH	PENUH	SEDANG	SEDANG
4	NORMAL	KURANG	CEPAT	LAMA
5	NORMAL	CUKUP	CEPAT	SEDANG
6	NORMAL	PENUH	MATI	MATI
7	TINGGI	KURANG	MATI	LAMA
8	TINGGI	CUKUP	MATI	SEDANG
9	TINGGI	PENUH	MATI	MATI

(c) Variabel Durasi Pompa

Variabel *fuzzy* untuk durasi pompa nutrisi air dibagi menjadi tiga himpunan *fuzzy*: Diam, Cepat, Sedang, Lama seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6 (a). Variabel *fuzzy* untuk durasi pompa nutrisi air dibagi menjadi tiga himpunan *fuzzy*: Diam, Cepat, dan Lama, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6 (b).

Pembentukan Basis Aturan (*Fuzzy Rule*)

Basis aturan adalah aturan yang berisi sejumlah aturan *fuzzy* yang memetakan nilai masukan ke nilai keluaran. Aturan ini sering dinyatakan dengan format IF – THEN. Kaidah tersebut dinyatakan dengan pernyataan bersyarat: “Jika <proporsi > Maka <proporsi >”. Pada Tabel 1 merupakan aturan-aturan yang digunakan pada penelitian ini.

Prosedur Pengujian Sistem

Dalam penelitian ini, pengujian dilakukan pada tiga aspek utama: sensor, kinerja sistem *fuzzy logic*, dan kinerja aplikasi IoT. Pengujian sensor dilakukan untuk memastikan keakuratan hasil pengukuran. Pengujian ini meliputi Sensor TDS diuji dengan membandingkan hasil pembacaannya dengan alat ukur standar TDS meter digital (TDS-3) dengan variasi larutan nutrisi AB Mix. Sensor ultrasonik diuji dengan membandingkan hasil pengukurannya terhadap alat ukur meteran pada berbagai ketinggian air. Sementara itu, sensor suhu DS18B20 diuji dengan membandingkan hasil pembacaannya dengan termometer standar. Hasil pengujian ini digunakan untuk menilai tingkat akurasi setiap sensor yang terlibat dalam sistem.

Pengujian kinerja sistem *fuzzy logic* akan dilakukan di lingkungan laboratorium dengan kondisi terkontrol menggunakan tanaman mentimun (*Cucumis sativus L.*) dalam sistem hidroponik DFT. Mentimun memiliki empat fase pertumbuhan yaitu Fase Perkecambahan (3-10 hari), *Early Growth* (2-4 minggu), *Mid-Growth* (Pre-Fruiting) (4-6 minggu), *Flowering and Fruiting* (8-10 minggu). Pada setiap fase pertumbuhan membutuhkan nutrisi yang berbeda [21]. Nilai PPM yang dibutuhkan pada fase *Early Growth* berkisar 300-500, fase *Mid-Growth* (Pre-Fruiting) berkisar 800-1000, fase *Flowering and Fruiting* membutuhkan nutrisi berkisar 1190-1750. Dalam pengujian ini akan dilakukan dalam dua fase pertumbuhan tanaman yaitu pada fase pertama dan fase kedua. Pengujian kinerja aplikasi IoT juga dilakukan untuk menilai kemampuan sistem dalam mengirim dan menampilkan data secara real-time. Sensor yang terhubung dengan NodeMCU ESP32 mengirim data ke cloud, dan respons sistem dalam menampilkan perubahan data diuji dengan batas waktu tidak lebih dari 5 detik. Selain itu, pengujian aplikasi *HydroSmart Control* juga dilakukan untuk memastikan bahwa pengguna dapat memantau data sensor secara langsung serta dapat mengubah mode operasi sistem dari otomatis ke manual dan sebaliknya apabila diperlukan.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Implementasi Sistem

Penelitian ini berhasil mengimplementasikan sistem hidroponik DFT yang terintegrasi dengan perangkat pengontrolan dan pemantauan nutrisi berbasis *Internet of Things* (IoT). Hasil implementasi sistem secara keseluruhan dapat dilihat pada Gambar 7. Perangkat pengontrolan, yang terdiri dari mikrokontroler dan sensor, dipasang didalam kotak panel (Gambar 7-b), hasil pembacaan sensor TDS ditampilkan melalui layar LCD di bagian depan panel tersebut (Gambar 7-a). Nutrisi pada tandon akan dialirkan ke setiap tanaman melalui sistem sirkulasi menuju lubang media tanam yang dikendalikan oleh pompa dan terhubung melalui pipa (Gambar 7-c-d). Untuk memastikan ketersediaan nutrisi, ketinggian air dalam tandon nutrisi diukur secara berkala menggunakan sensor ultrasonik (Gambar 7-e). Data dari sensor ultrasonik dan sensor TDS kemudian diproses sebagai masukan dalam perhitungan *fuzzy logic* guna mengoptimalkan pengendalian nutrisi secara otomatis. Aplikasi ini memungkinkan pengguna untuk memantau secara real-time berbagai parameter penting seperti kadar nutrisi, suhu, serta ketersediaan nutrisi dan air dalam tandon (Gambar 7-f). Selain itu, aplikasi *HydroSmart Control* digunakan untuk memonitor sistem dan mengendalikan operasi sistem, termasuk mengubah mode dari otomatis ke manual atau sebaliknya (Gambar 7-g).



Gambar 7. Implementasi Sistem (a) Layar LCD, (b) Perangkat Mikrokontroler, (c) Media hidroponik, (d) Pipa Sirkulasi Nutrisi, (e) Tandon Nutrisi, (f) Aplikasi, (g) Pengaturan Sistem Melalui Aplikasi

Tabel 2. Hasil Pengujian Sensor TDS

Percobaan ke-	Sensor TDS	TDS Meter	Error (%)
1	633,00	631,00	0,32
2	713,78	713,00	0,11
3	783,38	784,00	0,08
4	809,55	790,00	2,47
5	837,52	833,00	0,54
6	862,64	839,00	2,82
7	868,77	850,00	2,21
8	934,54	923,00	1,25
9	952,25	930,00	2,39
10	977,90	974,00	0,40

Kinerja Akurasi Sensor TDS

Tahap awal pengujian dilakukan untuk mengevaluasi akurasi sensor TDS yang digunakan pada penelitian, guna memastikan bahwa hasil pengukurannya sesuai dengan nilai sebenarnya. Dalam 10 percobaan menggunakan larutan nutrisi AB Mix, hasil pembacaan sensor TDS dibandingkan dengan TDS meter digital (TDS-3) untuk pengujian ini. Hasil pengujian ditampilkan pada Tabel 2, sementara perhitungan *error* dilakukan menggunakan Persamaan 4.

$$\% \text{ error} = \frac{(Data_{Sensor} - Data_{Meter})}{(Data_{Meter})} \times 100\% \quad (4)$$

Dari hasil pengujian, sensor TDS yang digunakan untuk mengukur konsentrasi nutrisi dalam air menunjukkan tingkat kesalahan relatif sebesar 1,81%. Persentase kesalahan ini menunjukkan bahwa akurasi sensor TDS dalam mengukur kadar total padatan terlarut (TDS) cukup baik, dengan kesalahan pengukuran yang relatif kecil.

Kinerja Sensor Ultrasonik

Pengujian sensor ultrasonik bertujuan untuk mengukur akurasi sensor tersebut. Pengujian dilakukan dengan membandingkan nilai yang dibaca oleh sensor dengan hasil dari alat ukur jarak standar. Data diambil sebanyak 10 kali dengan jarak pengujian maksimum 35 cm. Hasil pengukuran disajikan dalam Tabel 3.

Tabel 3 menyajikan hasil pengujian sensor ultrasonik yang dilakukan pada tandon air dengan 10 kali percobaan. Sensor ultrasonik menunjukkan tingkat akurasi yang cukup tinggi yakni sebesar 98,78%. Hal ini menunjukkan bahwa sensor ultrasonik mampu mengukur ketinggian air dengan cukup baik dan memadai untuk aplikasi dalam sistem hidroponik.

Kinerja Sensor Suhu

Pengujian sensor suhu dilakukan melalui 10 kali percobaan. Data yang diperoleh dari sensor tersebut kemudian dibandingkan dengan hasil pengukuran manual menggunakan termometer TDS-3 untuk memverifikasi tingkat keakuratannya. Sensor suhu DS18B20 menunjukkan tingkat *error* sebesar yang cukup tinggi yaitu 3,91%. Hasil pengujian disajikan pada Tabel 4.

Pengujian Aplikasi Pemantauan

Tahap selanjutnya dilakukan pengujian pada fitur aplikasi *HydroSmart Control* yang telah dibuat. Pemantauan sistem hidroponik DFT yang terintegrasi dengan perangkat pengontrolan dapat dipantau secara *real-time* melalui aplikasi. Data hasil pembacaan sensor diproses oleh mikrokontroler dan diteruskan ke penyimpanan *cloud* melalui modul ESP32, sehingga data tersebut dapat diakses melalui aplikasi pada ponsel pintar. Aplikasi ini berhasil dikembangkan untuk memonitor nutrisi pada media hidroponik dan persediaan air di tandon.

Tabel 3. Hasil Pengujian Sensor Ultrasonik (HC-SR04)

Percobaan ke-	Pengukuran Meteran (cm)	Sensor Ultrasonik (cm)	Selisih	Error (%)
1	5	5,09	0,09	1,80
2	7	7,1	0,10	1,43
3	10	10,16	0,16	1,60
4	15	15,4	0,40	2,67
5	18	18,3	0,3	1,67
6	20	20,02	0,02	0,10
7	25	25,17	0,17	0,68
8	27	27,06	0,06	0,22
9	30	30,43	0,43	1,43
10	35	35,2	0,2	0,57
	Rata-Rata			1,22

Tabel 4. Hasil Pengujian Suhu DS18B20

Percobaan ke-	Pengukuran Sensor (°C)	Thermometer (°C)	Selisih (°C)	Error (%)
1	13,86	12,9	0,96	7,44
2	15,3	14,1	1,2	8,51
3	21,1	20,6	0,5	2,43
4	25	24,9	0,1	0,40
5	30	28,6	1,4	4,90
6	37,3	36,2	1,1	3,04
7	42,1	40,8	1,3	3,19
8	44,22	42,5	1,72	4,05
9	47	45,9	1,1	2,40
10	49,5	48,19	1,31	2,72
	Rata-Rata			3,91

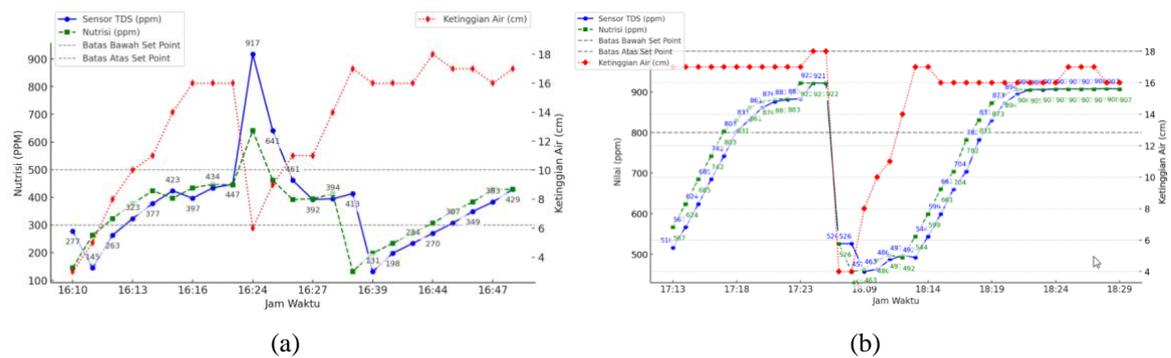
Tampilan aplikasi *HydroSmart Control* dapat dilihat pada Gambar 7-(f-g). Selain itu, aplikasi ini memiliki fitur tambahan berupa informasi usia tanaman, yang membantu pengguna melakukan monitoring dengan lebih efektif.

Pengujian Sistem Pengendalian

Pada tahap pengujian ini, sistem kendali *fuzzy* yang telah dirancang diuji pada sistem hidroponik untuk tanaman mentimun (*Cucumis sativus L.*). Pengambilan data dilakukan dalam dua fase: fase 1 dan fase 2. Pada fase 1, tanaman membutuhkan nutrisi antara 300-500 ppm, sedangkan pada fase 2, kebutuhan nutrisi meningkat menjadi 800-1000 ppm. Hasil pengujian disajikan dalam Gambar 8 dan 9. Data tersebut dihasilkan dari sistem otomatis yang berjalan dengan jeda 60 detik setelah setiap menyalakan pompa.

Pengujian sistem pengontrolan nutrisi hidroponik berbasis *fuzzy logic* menunjukkan kemampuan adaptasi yang efektif dalam menyesuaikan kadar nutrisi sesuai kebutuhan tanaman. Pada fase pertama, sistem berfungsi dengan baik untuk meningkatkan kadar TDS dari 145 ppm hingga 447 ppm dalam waktu sekitar delapan menit, memenuhi kebutuhan tanaman pada tahap awal pertumbuhan. Ketika nilai TDS terdeteksi rendah, yaitu 277 ppm, sistem secara otomatis mengaktifkan pompa nutrisi untuk meningkatkan kadar nutrisi dalam larutan. Setelah mendekati ambang batas yang telah ditentukan, sistem menonaktifkan pompa untuk menjaga kestabilan kadar TDS. Sistem juga menunjukkan respons adaptif ketika kadar TDS menurun akibat penambahan air pada tandon, dengan mengaktifkan kembali pompa nutrisi untuk menyeimbangkan kadar nutrisi. Pada fase kedua, kebutuhan nutrisi meningkat dalam kisaran 800-1000 ppm. Sistem kembali menunjukkan respons serupa, meningkatkan TDS dari 516 ppm hingga mencapai 923 ppm, kemudian menonaktifkan pompa nutrisi untuk menjaga stabilitas. Ketika terjadi penurunan nilai TDS akibat perubahan volume air, sistem menyesuaikan dengan mengaktifkan pompa hingga kadar nutrisi kembali optimal. Temuan ini menekankan bahwa sistem *fuzzy logic* tidak hanya mampu mengelola nutrisi secara efisien, tetapi juga dapat beradaptasi secara otomatis dengan kondisi lingkungan yang berubah, menjadikannya solusi yang efektif untuk pengelolaan nutrisi dalam budidaya hidroponik.

Secara keseluruhan, hasil pengujian pada kedua fase ini menunjukkan bahwa sistem pengontrolan nutrisi berbasis *fuzzy logic* mampu beradaptasi dengan kebutuhan nutrisi tanaman pada setiap tahap pertumbuhan. Sistem ini dapat mempertahankan kadar nutrisi dalam rentang yang sesuai secara otomatis tanpa intervensi manual, sehingga meningkatkan efisiensi dalam pengelolaan hidroponik. Selain itu, mekanisme pengendalian yang berbasis *fuzzy logic* memungkinkan sistem untuk merespons perubahan kondisi secara *real-time*, seperti penurunan kadar TDS akibat penambahan air atau kebutuhan nutrisi yang meningkat seiring dengan pertumbuhan tanaman. Dengan demikian, penerapan sistem ini dapat menjadi solusi yang efisien untuk mengoptimalkan manajemen nutrisi hidroponik secara otomatis, mengurangi risiko kesalahan dari pemantauan manual, dan dapat meningkatkan produktivitas pertanian berbasis teknologi. Namun, penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan, terutama terkait aspek teknis dan implementasi sistem. Sensor DFRobot Analog TDS Sensor Meter yang digunakan hanya mampu membaca hingga 1000 ppm, sedangkan tanaman mentimun membutuhkan nutrisi hingga 1750 ppm.



Gambar 8. Grafik Hasil Pengukuran Nutrisi pada Sistem Hidroponik dengan *Fuzzy Logic* (a) Fase 1, (b) Fase 2

Keterbatasan ini dapat memengaruhi akurasi pengukuran nutrisi pada fase tertentu, yang pada akhirnya berdampak pada efektivitas kendali fuzzy dalam menjaga keseimbangan nutrisi tanaman. Oleh karena itu, untuk penelitian selanjutnya, diperlukan sensor dengan rentang pengukuran yang lebih tinggi agar sistem dapat mengontrol nutrisi secara lebih akurat, terutama pada fase pertumbuhan lanjutan. Dengan peningkatan ini, efektivitas sistem *fuzzy logic* dalam mengoptimalkan nutrisi tanaman hidroponik dapat lebih ditingkatkan, sehingga mendukung pertumbuhan tanaman yang lebih optimal dan produktivitas yang lebih baik.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil implementasi dan pengujian sistem pengontrolan nutrisi hidroponik berbasis *fuzzy logic*, dapat disimpulkan bahwa sistem ini mampu menyesuaikan kadar nutrisi sesuai dengan kebutuhan tanaman di setiap fase pertumbuhannya. Sistem bekerja secara otomatis dengan mengaktifkan dan menonaktifkan pompa nutrisi berdasarkan nilai TDS yang terdeteksi, sehingga mampu menjaga kadar nutrisi dalam rentang optimal tanpa intervensi manual. Pada fase pertama, sistem berhasil meningkatkan nilai TDS secara bertahap sesuai kebutuhan tanaman muda, sedangkan pada fase kedua, sistem mempertahankan kadar nutrisi dalam kisaran 800-1000 ppm, yang merupakan kebutuhan optimal bagi tanaman dalam fase pertumbuhan lebih lanjut. Meskipun sistem menunjukkan kinerja yang baik, terdapat keterbatasan pada sensor TDS yang hanya mampu membaca hingga 1000 ppm, sehingga memengaruhi akurasi pengukuran pada fase tertentu. Oleh karena itu, pengembangan lebih lanjut diperlukan untuk meningkatkan efektivitas sistem dalam mengoptimalkan nutrisi tanaman hidroponik.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Direktur Akademik Pendidikan Tinggi Vokasi - Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi atas dukungan pendanaan penelitian ini melalui skema Penelitian Dosen Pemula. Pendanaan ini diberikan berdasarkan kontrak nomor 0520/D4/AL.04/2024 dan bersumber dari Pendanaan BOPTN Program Penelitian dan Pengabdian Masyarakat Dosen Vokasi Tahun Anggaran 2024.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Y. Akkem, S. K. Biswas, and A. Varanasi, "Smart farming using artificial intelligence: A review," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 120, p. 105899, Apr. 2023, doi: 10.1016/J.ENGAPAI.2023.105899.
- [2] R. G. Alves, R. F. Maia, and F. Lima, "Development of a Digital Twin for smart farming: Irrigation management system for water saving," *Journal of Cleaner Production*, vol. 388, p. 135920, Feb. 2023, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2023.135920.
- [3] I. J. Alail, R. Candra, Y. Karyanti, Y. Chalri, and H. Rasjid, "Rancang Bangun Miniatur Angkutan Umum Autonomous Dengan Kendali Berbasis Iot," *Jurnal Ilmiah Informatika Komputer*, vol. 27, no. 1, pp. 19–31, 2022, doi: 10.35760/ik.2022.v27i1.6100.
- [4] A. Kusumaningrum *et al.*, "Rancang Bangun Internet of Things Berbasis Web," vol. 29, no. 3, pp. 316–326, 2024.
- [5] R. A. Rachman and E. Haryatmi, "Rancang Bangun Absensi Mahasiswa Menggunakan Sidik Jari

- Pada Raspberry Pi Berbasis Internet of Things (Iot) Secara Real Time,” *Jurnal Ilmiah Informatika Komputer*, vol. 23, no. 3, pp. 154–165, 2018, doi: 10.35760/ik.2018.v23i3.2371.
- [6] R. D. Sindhu, I. Sari, and D. P. Lestari, “Pembuatan Prototype Smart Home Menggunakan Nodemcu Esp8266 V3 Dan Chat Bot Pada Smartphone Android,” *Jurnal Ilmiah Informatika Komputer*, vol. 26, no. 2, pp. 123–135, 2021, doi: 10.35760/ik.2021.v26i2.4157.
- [7] W. Tao, L. Zhao, G. Wang, and R. Liang, “Review of the internet of things communication technologies in smart agriculture and challenges,” *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 189, p. 106352, Oct. 2021, doi: 10.1016/J.COMPAG.2021.106352.
- [8] G. Kaur, P. Upadhyaya, and P. Chawla, “Comparative analysis of IoT-based controlled environment and uncontrolled environment plant growth monitoring system for hydroponic indoor vertical farm,” *Environmental Research*, vol. 222, p. 115313, Apr. 2023, doi: 10.1016/J.ENVRES.2023.115313.
- [9] P. Thakur and M. Malhotra, “Role of IOT in Automated Hydroponic System: A Review BT - Emerging Technologies in Data Mining and Information Security,” 2023, pp. 349–357.
- [10] A. S. Rathor, S. Choudhury, A. Sharma, P. Nautiyal, and G. Shah, “Empowering vertical farming through IoT and AI-Driven technologies: A comprehensive review,” *Heliyon*, vol. 10, no. 15, p. e34998, 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e34998.
- [11] K. D. Yulianto, A. Maududie, and N. El Maidah, “Implementasi Metode Fuzzy Sebagai Sistem Kontrol Kepekatan Nutrisi Otomatis Tanaman Hidroponik Berbasis Mikrokontroler Pasa Rangkaian Nutrient Film Technique (NFT),” *INFORMAL: Informatics Journal*, vol. 7, no. 1, p. 16, 2022, doi: 10.19184/isj.v7i1.29386.
- [12] A. F. Amalia *et al.*, “Artificial intelligence for small hydroponics farms employing fuzzy logic systems and economic analysis,” *Revista Brasileira de Engenharia Agricola e Ambiental*, vol. 27, no. 9, pp. 690–697, 2023, doi: 10.1590/1807-1929/agriambi.v27n9p690-697.
- [13] P. Atmaja and N. Surantha, “Smart hydroponic based on nutrient film technique and multistep fuzzy logic,” *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 12, no. 3, pp. 3146–3157, 2022, doi: 10.11591/ijece.v12i3.pp3146-3157.
- [14] J. D. F. da Silveira, T. R. Martins, C. N. da Silva, and J. V. dos Reis, “New Solution based on Fuzzy System for Planning IoT Communication Infrastructure for Rural Areas,” in *2021 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE)*, 2021, pp. 1–6. doi: 10.1109/FUZZ45933.2021.9494578.
- [15] E. Leibar-Porcel, M. R. McAinsh, and I. C. Dodd, “Elevated Root-Zone Dissolved Inorganic Carbon Alters Plant Nutrition of Lettuce and Pepper Grown Hydroponically and Aeroponically,” *Agronomy*, vol. 10, no. 3. 2020. doi: 10.3390/agronomy10030403.
- [16] X. Li, J. Dong, N. Gruda, W. Chu, and Z. Duan, “Correction to: Does the short-term fluctuation of mineral element concentrations in the closed hydroponic experimental facilities affect the mineral concentrations in cucumber plants exposed to elevated CO₂? (Plant and Soil, (2021), 465, 1-2, (125-141), 1,” *Plant and Soil*, vol. 466, no. 1–2, p. 677, 2021, doi: 10.1007/s11104-021-05050-4.
- [17] F. SURYATINI, S. PANCONO, S. B. BHASKORO, and P. M. S. MULJONO, “Sistem Kendali Nutrisi Hidroponik berbasis Fuzzy Logic berdasarkan Objek Tanam,” *ELKOMIKA: Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, & Teknik Elektronika*, vol. 9, no. 2, p. 263, 2021, doi: 10.26760/elkomika.v9i2.263.
- [18] K. K. Y. Shin, T. P. Ping, M. G. B. Ling, C. Chee Jiun, and N. A. B. Bolhassan, “SMART GROW – Low-cost automated hydroponic system for urban farming,” *HardwareX*, vol. 17, no. November 2023, p. e00498, 2024, doi: 10.1016/j.ohx.2023.e00498.
- [19] Bayu WN, “Kelebihan dan Kekurangan Sistem Hidroponik DFT,” 2018. <https://hidroponikpedia.com/kelebihan-dan-kekurang-sistem-hidroponik-dft/>
- [20] U. Y. O. Budi Indra Gunawan, “Fuzzifikasi adalah langkah awal dalam logika fuzzy. Langkah ini berfungsi untuk menerjemahkan input data dari sensor ke dalam himpunan fuzzy dengan menentukan nilai derajat keanggotaan.,” *Masa Berlaku Mulai*, vol. 1, no. 3, pp. 1–9, 2017.
- [21] Daria, “PPM Chart for Hydroponics: Level Adjustments Guide for 2023,” 2023. <https://thisgardener.com/ppm-chart-for-hydroponics/>