

Sistem Cerdas Pengelolaan Nutrisi Dan Ph Pada Tanaman Hidroponik Berbasis Iot Dengan Metode Fuzzy Logic

1st Afif Adityawan
Fakultas Teknik Elektro
Telkom University
Bandung, Indonesia
afifadit@student.telkomuniversity.ac.id

2nd Muhammad Ary Murti
Fakultas Teknik Elektro
Telkom University
Bandung, Indonesia
arymurti@telkomuniversity.ac.id

3rd Erwin Susanto
Fakultas Teknik Elektro
Telkom University
Bandung, Indonesia
erwinelektro@telkomuniversity.ac.id

Abstrak — Pertanian hidroponik merupakan metode budidaya modern yang mampu meningkatkan efisiensi penggunaan air dan produktivitas tanaman. Namun demikian, kestabilan pH dan konsentrasi nutrisi (TDS) pada larutan hidroponik sering mengalami fluktuasi yang dapat menghambat penyerapan hara serta menurunkan kualitas pertumbuhan tanaman. Penelitian ini merancang sistem pengelolaan pH dan nutrisi berbasis Internet of Things (IoT) menggunakan mikrokontroler ESP32 dengan implementasi metode Fuzzy Logic Mamdani sebagai kendali otomatis untuk menjaga parameter larutan tetap berada pada rentang ideal. Sistem menggunakan sensor pH 4502C dan sensor TDS DFRobot sebagai input utama fuzzy, serta pompa pH Up, pH Down, dan nutrisi sebagai aktuator. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sensor pH memiliki deviasi rata-rata $\pm 0,3$ pH dan sensor TDS deviasi $\pm 2,1$ ppm dari nilai acuan, keduanya berada dalam batas toleransi $\leq 5\%$. Kontrol fuzzy mampu menstabilkan pH pada rentang 5,5–6,5 dan TDS pada 700–1000 ppm dengan waktu stabilisasi masing-masing 2–3 menit dan 3–4,5 menit. Sistem IoT yang dikembangkan mampu mengirimkan data sensor ke Firebase setiap dua detik dengan latensi rata-rata 1,3 detik dan tanpa packet loss, sehingga memungkinkan monitoring real-time melalui aplikasi Kodular. Secara keseluruhan, sistem berhasil mempertahankan kondisi larutan pada rentang ideal selama 97% waktu operasi dan meningkatkan efisiensi aktivasi pompa hingga 67%. Hasil ini menunjukkan bahwa integrasi IoT dan Fuzzy Logic Mamdani efektif untuk otomatisasi pengelolaan hidroponik secara adaptif, presisi, dan berkelanjutan.

Kata kunci — Hidroponik, Internet of Things, Fuzzy Logic Mamdani, pH, TDS, ESP32.

I. PENDAHULUAN

Pertumbuhan jumlah penduduk dan meningkatnya kebutuhan pangan mendorong pemanfaatan teknologi pertanian modern untuk meningkatkan produktivitas secara efisien. Hidroponik menjadi salah satu metode yang semakin banyak digunakan karena mampu mengoptimalkan penggunaan air hingga 70% lebih hemat dibandingkan pertanian konvensional serta memungkinkan budidaya di lahan terbatas [1], [2]. Meskipun demikian, keberhasilan sistem hidroponik sangat dipengaruhi oleh kestabilan pH dan konsentrasi nutrisi (TDS), di mana deviasi kecil dari rentang ideal (pH 5,5–6,5 dan TDS 700–1000 ppm) dapat menurunkan kemampuan tanaman dalam menyerap unsur hara secara optimal [3], [4].

Hasil survei pada pelaku hidroponik skala kecil hingga komersial menunjukkan bahwa sekitar 80% pengguna masih melakukan pengaturan pH dan nutrisi secara manual, dengan rata-rata keterlambatan respons mencapai 15–20 menit akibat keterbatasan waktu dan frekuensi pemantauan [5], [6]. Pendekatan manual ini menyebabkan tingginya fluktuasi parameter harian, yaitu $\pm 0,5$ pH dan ± 50 ppm, sehingga

berdampak negatif terhadap kualitas pertumbuhan tanaman. Oleh karena itu, diperlukan sistem otomatis yang mampu merespons perubahan kondisi larutan secara cepat, adaptif, dan presisi.

Berbagai penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa teknologi Internet of Things (IoT) dapat meningkatkan efektivitas sistem pemantauan hidroponik melalui akuisisi data secara real-time dan kemampuan kontrol jarak jauh [7]. Namun, sistem berbasis threshold masih kurang fleksibel dalam menangani ketidakpastian nilai sensor. Metode Fuzzy Logic, terutama tipe Mamdani, terbukti lebih adaptif dalam mengatur parameter hidroponik karena mampu memodelkan kondisi sistem yang tidak linier dan penuh ketidakpastian. Alam dan Nasuha menunjukkan bahwa fuzzy logic mampu mempertahankan pH dengan akurasi 98,38% dan waktu stabilisasi rata-rata 64 detik [8]. Penelitian lain oleh Suryatini dkk. melaporkan keberhasilan kendali nutrisi sebesar 95,14% menggunakan fuzzy logic [9]. Dengan demikian, fuzzy logic menawarkan kinerja lebih baik dibandingkan pengendali PID atau logika tetap yang cenderung menghasilkan deviasi besar pada kondisi lingkungan yang berubah-ubah [10], [11], [12].

Melihat urgensi tersebut, penelitian ini bertujuan merancang sistem cerdas untuk pengelolaan pH dan nutrisi pada tanaman hidroponik berbasis IoT yang terintegrasi dengan metode Fuzzy Logic Mamdani. Sistem ini dirancang untuk mendeteksi kondisi larutan secara real-time menggunakan sensor pH dan TDS, kemudian melakukan pengaturan otomatis melalui aktuator pompa nutrisi, pH Up, dan pH Down berdasarkan keputusan fuzzy. Integrasi IoT memungkinkan pengguna memantau kondisi sistem melalui aplikasi mobile secara kontinu. Dengan pendekatan ini, diharapkan sistem mampu menjaga parameter larutan tetap stabil, mengurangi intervensi manual, serta meningkatkan efisiensi dan reliabilitas budidaya hidroponik modern [11], [12].

II. KAJIAN TEORI

A. Hidroponik

Hidroponik adalah metode budidaya tanaman tanpa tanah dengan memanfaatkan larutan nutrisi sebagai media utama. Sistem ini mampu meningkatkan efisiensi penggunaan air hingga 70% dan mempercepat pertumbuhan tanaman hingga 30–50% dibandingkan metode konvensional [2], [3]. Parameter penting dalam hidroponik adalah pH dan konsentrasi nutrisi (TDS), yang secara langsung memengaruhi ketersediaan unsur hara. Tanaman daun seperti selada dan pakcoy membutuhkan pH ideal 5,5–6,5 serta TDS 700–1000 ppm untuk mencapai pertumbuhan optimal [13], [14].

B. Internet of Things

Internet of Things (IoT) adalah konsep integrasi perangkat fisik yang mampu mengumpulkan dan mengirimkan data melalui jaringan internet secara otomatis [15]. Dalam konteks hidroponik, IoT memungkinkan pemantauan parameter lingkungan (pH, TDS, suhu, cahaya) secara real-time dan mengurangi kebutuhan intervensi manual. Penggunaan mikrokontroler seperti ESP32 dengan konektivitas Wi-Fi mempercepat proses akuisisi dan pengiriman data ke platform cloud seperti Firebase, sehingga sistem dapat diakses dari perangkat mobile kapan pun dan di mana pun [10], [16].

C. Fuzzy Logic Mamdani

Fuzzy Logic merupakan metode pengendalian berbasis pendekatan linguistik yang dirancang untuk menangani ketidakpastian dan sistem nonlinier [17]. Tipe Mamdani banyak digunakan dalam pengendalian hidroponik karena mampu merepresentasikan pola pikir manusia melalui aturan IF-THEN, serta menyediakan keluaran yang halus melalui proses defuzzifikasi [18], [19]. Model Fuzzy Mamdani terdiri dari tiga tahap utama:

1. Fuzzifikasi, mengubah input sensor (pH dan TDS) menjadi variabel linguistik seperti “rendah”, “normal”, dan “tinggi”;
2. Inferensi, menggunakan aturan fuzzy untuk menentukan aksi kendali berdasarkan kombinasi input;
3. Defuzzifikasi, mengubah output fuzzy menjadi nilai crisp, umumnya menggunakan metode centroid.

Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa metode Mamdani mampu menjaga pH dan nutrisi lebih stabil dibandingkan PID atau threshold, dengan error rata-rata $\leq 0,3$ pH dan $\leq 2\%$ untuk TDS [8], [9], [13].

D. Sistem Pengelolaan pH dan Nutrisi

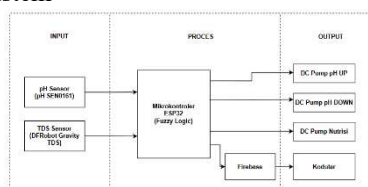
Kontrol pH dan TDS merupakan aspek penting pada sistem hidroponik karena menentukan efisiensi penyerapan nutrisi. Sensor pH digunakan untuk mendeteksi tingkat keasaman larutan, sedangkan sensor TDS mengukur konsentrasi mineral terlarut dalam ppm [20], [21]. Pada sistem otomatis, perubahan pH dikompensasi dengan penambahan larutan pH Up atau pH Down, sedangkan nilai TDS dikoreksi menggunakan penambahan nutrisi cair. Rentang ideal masing-masing parameter adalah:

- pH: 5,5–6,5
- TDS: 700–1000 ppm

Fluktuasi pH yang terlalu tinggi atau rendah dapat menghambat penyerapan unsur hara, sedangkan TDS di bawah standar menurunkan produktivitas tanaman. Oleh karena itu, integrasi sensor akurat dan kendali otomatis berbasis fuzzy sangat penting untuk menjaga kestabilan larutan nutrisi [10].

III. METODE

A. Desain Sistem



GAMBAR 1
Desain Sistem

Pada **gambar 3.1** sistem ini Sistem pengelolaan nutrisi dan pH hidroponik dirancang dengan memanfaatkan

mikrokontroler ESP32 sebagai unit pemrosesan utama. Sensor pH dan sensor TDS digunakan sebagai masukan untuk mengukur kondisi larutan secara real-time. Data sensor kemudian diproses menggunakan algoritma Fuzzy Logic Mamdani untuk menentukan aksi kendali berupa aktivasi pompa pH Up, pH Down, dan pompa nutrisi. Selain itu, ESP32 mengirimkan data ke Firebase Realtime Database untuk monitoring jarak jauh menggunakan aplikasi Kodular.

Komponen yang terlibat dalam sistem meliputi:

- ESP32 sebagai pusat kontrol,
- Sensor pH dan TDS sebagai pembaca kondisi larutan,
- Modul relay sebagai pengendali pompa,
- Pompa DC untuk penambahan larutan koreksi,
- Firebase sebagai basis data cloud,
- Aplikasi Kodular sebagai tampilan monitoring.

B. Desain Fuzzy Logic Mamdani

Fuzzy Logic digunakan untuk mengatur nilai pH dan TDS berdasarkan kondisi aktual larutan. Sistem fuzzy memiliki dua input dan dua output, yaitu:

1) Input Fuzzy

- pH: Rendah, Normal, Tinggi
- TDS: Rendah, Ideal, Tinggi

Rentang keanggotaan ditentukan berdasarkan standar kebutuhan tanaman hidroponik seperti selada dan pakcoy [13], [14].

2) Output Fuzzy

- pH Action: pH Up, Maintain, pH Down
- Nutrient Action: Add Nutrient, Maintain

Fuzzy Rule Base disusun berdasarkan hubungan kondisi input-output, misalnya:

- Jika pH rendah dan TDS rendah → aktifkan pompa pH Up dan pompa nutrisi,
- Jika pH tinggi dan TDS ideal → aktifkan pompa pH Down,
- Jika pH normal dan TDS ideal → semua pompa tidak aktif.

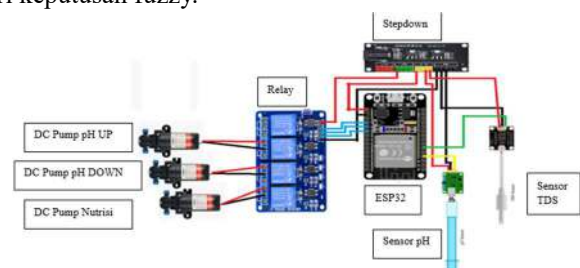
3) Proses Inferensi

Metode Mamdani digunakan dengan:

- Operator min untuk AND,
- Operator max untuk OR,
- Agregasi seluruh aturan menggunakan metode max,
- Defuzzifikasi menggunakan metode centroid [18], [19].

C. Perancangan Perangkat Keras

Perancangan perangkat keras dilakukan dengan menghubungkan sensor pH dan sensor TDS ke ESP32 secara analog, modul relay sebagai driver pompa, serta catu daya 12 V untuk pompa DC. Pompa pH Up, pH Down, dan pompa nutrisi bekerja berdasarkan perintah ESP32 yang dihasilkan dari keputusan fuzzy.



GAMBAR 2
Desain Perangkat Keras

D. Perancangan Perangkat Lunak

Perangkat lunak dikembangkan menggunakan:

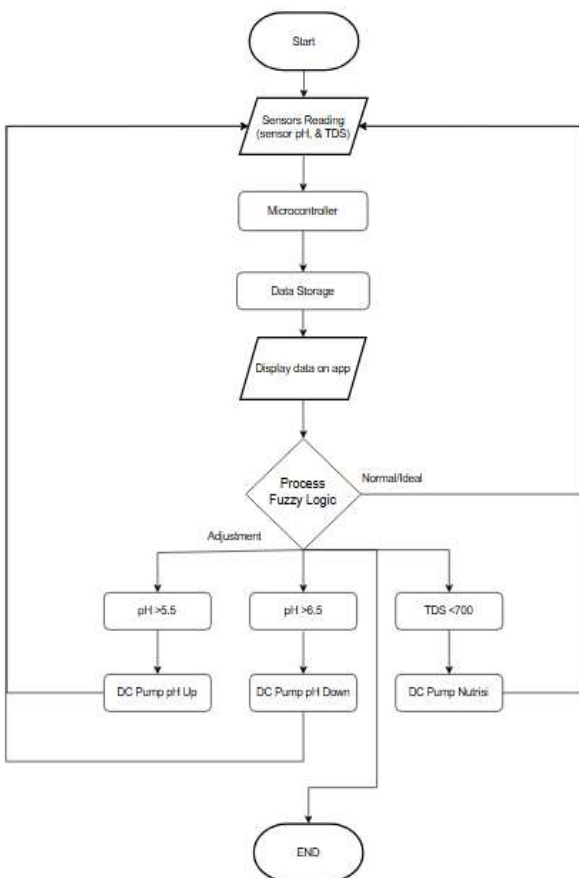
- Arduino IDE untuk pemrograman ESP32,
- Firebase Realtime Database untuk pengiriman dan penyimpanan data,
- Kodular untuk antarmuka monitoring berbasis IoT.

ESP32 membaca data sensor setiap 2 detik, menjalankan proses fuzzy logic, mengaktifkan relay jika diperlukan, kemudian mengirimkan data terbaru ke Firebase dalam format JSON. Aplikasi Kodular mengambil data ini secara real-time untuk ditampilkan kepada pengguna..

E. Alur Kerja Sistem

Alur kerja sistem secara keseluruhan sebagai berikut:

1. ESP32 melakukan inisialisasi koneksi dan sensor.
2. Sensor pH dan TDS membaca kondisi larutan.
3. Nilai sensor diproses melalui Fuzzy Logic Mamdani.
4. ESP32 mengaktifkan pompa sesuai hasil defuzzifikasi.
5. Data sensor, status pompa, dan output fuzzy dikirim ke Firebase.
6. Aplikasi Kodular menampilkan data secara real-time.
7. Sistem mengulang proses secara kontinu (loop).

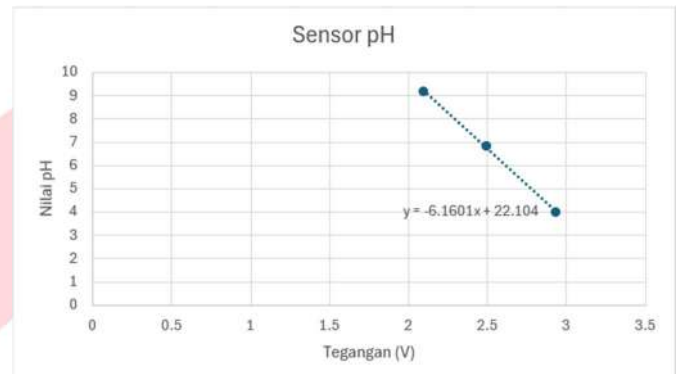


GAMBAR 3
Flowchart Sistem

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Pengujian Sensor pH

Pengujian sensor pH-4502C dilakukan menggunakan tiga larutan buffer standar (pH 4.01, 6.86, dan 9.18) dengan masing-masing 30 sampel untuk mengevaluasi akurasi dan stabilitas pembacaan. Hasil kalibrasi menunjukkan pola regresi linier dengan error rata-rata ±0.3 pH, masih sesuai dengan toleransi sistem kontrol hidroponik [13].



GAMBAR 4
Regresi Linier pH

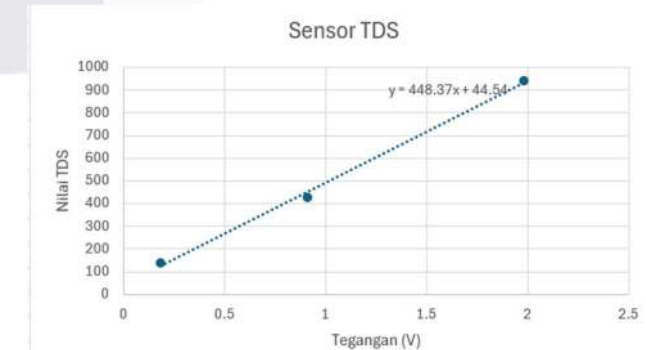
- Pada buffer pH 4.01, sensor membaca rentang 3.53–4.50 dengan rata-rata 4.12 pH.
- Pada buffer pH 6.86, pembacaan berada di 6.18–7.73, rata-rata 6.83 pH dengan akurasi 97.5%.
- Pada buffer pH 9.18, sensor menghasilkan rata-rata pembacaan 9.15 pH dengan linearitas >98%.

Hasil ini membuktikan bahwa sensor dapat digunakan sebagai input fuzzy logic secara stabil dan konsisten.

B. Pengujian Sensor TDS

Pengujian dilakukan pada tiga larutan standar: 141 ppm, 426 ppm, dan 944 ppm. Proses kalibrasi menghasilkan persamaan linier:

$TDS = 448.37 \times V + 44.54$, menunjukkan hubungan yang sangat kuat antara tegangan ADC dan nilai TDS.



GAMBAR 5
Regresi Linier TDS

- Error rata-rata sensor: ±2.1 ppm (≈1.8%)
- Akurasi berada jauh di bawah batas toleransi sensor (±10% F.S) [29].

Ringkasan hasil, Sensor menunjukkan stabilitas yang baik meskipun terjadi fluktuasi kecil akibat noise analog dan variabilitas suhu.

C. Pengujian Respon Waktu Sistem Berbasis Fuzzy Logic

Pengujian ini bertujuan mengukur kecepatan dan ketepatan sistem dalam menyalakan pompa sesuai output fuzzy logic. Tabel ringkasan berikut menampilkan 5 skenario kondisi.

TABEL 1
Hasil Pengujian Respon Waktu Pompa Air

| No | Kategori pH-TDS | Fuzzy Output | Estimasi Delay | Waktu Mulai | Waktu Pompa Aktif | Delay Aktual (menit) | Durasi Pompa Menyala (detik) |
|----|-----------------------|-------------------------------------|----------------|-------------|-------------------|----------------------|------------------------------|
| 1 | pH Rendah, TDS Rendah | +45 (pH UP), +60 (Nutri) | 3 menit | 08:00 | 08:03 | 3,1 | 30 |
| 2 | pH Tinggi, TDS Rendah | -70 (pH DOWN), +65 (Nutri) | 3 menit | 08:10 | 08:13 | 2,9 | 30 |
| 3 | pH Normal, TDS Tinggi | 0 (pH Maintain), -50 (Nutri) | 0 menit | 08:20 | - | 0 | 0 |
| 4 | pH Normal, TDS Normal | 0 (pH Maintain), 0 (Nutri Maintain) | 0 menit | 08:30 | - | 0 | 0 |
| 5 | pH Tinggi, TDS Tinggi | -80 (pH DOWN), -60 (Nutri) | 0 menit | 08:40 | - | 0 | 0 |

- Pada kondisi kritis (pH rendah atau tinggi), fuzzy mengaktifkan pompa dengan delay estimasi 3 menit.
- Delay aktual rata-rata: 3.0 ± 0.12 menit.
- Akurasi estimasi fuzzy: $>96\%$.

Hal ini membuktikan bahwa fuzzy logic menghasilkan durasi aktivasi pompa yang realistis dan dapat direalisasikan oleh perangkat keras.

D. Perbandingan Estimasi Delay Fuzzy dan Delay Aktual

Pada pengujian ini, estimasi delay dihitung berdasarkan output fuzzy logic, di mana nilai output fuzzy dikonversi menjadi perkiraan waktu aktivasi pompa contoh, fuzzy output ± 45 direpresentasikan sebagai delay 3 menit. Sementara itu, waktu delay aktual diukur dari selisih antara waktu pembacaan sensor hingga pompa aktif menggunakan pengamatan Serial Monitor, log Firebase, dan Kodular. Hasil pengujian ditampilkan pada Tabel 4.2 berikut.

TABEL 2
Hasil Pengujian Perbandingan Estimasi Waktu

| No | Kondisi Simulasi | Fuzzy Output | Estimasi Delay (menit) | Delay Aktual (menit) | Selisih (menit) |
|----|-----------------------|--------------|------------------------|----------------------|-----------------|
| 1 | pH rendah, TDS rendah | +50 | 3 | 3.1 | 0.1 |
| 2 | pH tinggi, TDS rendah | -65 | 3 | 2.9 | -0.1 |
| 3 | pH rendah, TDS tinggi | +60 | 3 | 3.2 | 0.2 |
| 4 | pH normal, TDS normal | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | pH normal, TDS tinggi | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 6 | pH rendah, TDS ideal | +45 | 3 | 3 | 0 |
| 7 | pH normal, TDS rendah | 0 | 0 | 0 | 0 |

Pada seluruh skenario pengujian, delay aktual selalu berada sangat dekat dengan estimasi fuzzy, dengan selisih waktu antara 0–0.2 menit. Nilai ini menunjukkan bahwa fuzzy Mamdani mampu menghasilkan prediksi durasi pompa yang stabil dan realistis. Konsistensi ini sangat penting karena durasi pompa menentukan jumlah larutan pH/nutrisi yang ditambahkan ke sistem.

Hasil pengujian ini membuktikan bahwa sistem pengendalian cahaya berbasis *fuzzy logic* mamdani memiliki performa kendali yang cepat, akurat, dan stabil dalam menjaga intensitas cahaya di lingkungan hidroponik *indoor*. Tidak ditemukan adanya perubahan status lampu yang berulang (berkedip), yang menandakan bahwa sistem bekerja secara halus dan efisien. Dengan demikian, penerapan logika fuzzy pada pengendalian *LED Grow Light* terbukti efektif dalam menjaga stabilitas pencahayaan tanaman hidroponik serta membantu mempertahankan kondisi intensitas cahaya ideal untuk mendukung proses fotosintesis tanaman secara optimal di lingkungan *indoor*.

E. Pengujian Performansi Sistem Kendali Fuzzy Logic Mamdani

Pengujian performansi sistem kendali dilakukan untuk mengetahui kemampuan sistem Fuzzy Logic Mamdani dalam mempertahankan kestabilan pH dan konsentrasi nutrisi (TDS) pada sistem hidroponik berbasis IoT. Tujuan pengujian ini adalah menilai seberapa cepat sistem merespons perubahan kondisi larutan, tingkat kestabilan setelah pengendalian, serta menghitung error rata-rata antara nilai aktual dan setpoint yang telah ditentukan. Nilai setpoint yang digunakan ditetapkan pada pH = 6,0 ($\pm 0,5$) dan TDS = 900 ppm (± 100) sesuai kebutuhan optimal tanaman selada dan pakcoy.

TABEL 3
Hasil Pengujian performansi Sistem

| Parameter | Nilai Setpoint | Nilai Aktual Stabil | Waktu Respon | Error Rata-Rata | Keterangan |
|------------|----------------|---------------------|---------------|-----------------|------------------|
| pH Larutan | $6,0 \pm 0,5$ | 5,7 – 6,3 | 2 – 3 menit | 0,3 pH (5 %) | Stabil & Adaptif |
| TDS (ppm) | 900 ± 100 | 850 – 970 | 3 – 4,5 menit | 45 ppm (4,8 %) | Stabil & Efisien |

Berdasarkan tabel di atas, sistem mampu menjaga pH larutan dalam rentang 5,7–6,3 dengan error rata-rata 0,3 pH atau sekitar 5 % terhadap setpoint, sedangkan nilai TDS terjaga pada kisaran 850–970 ppm dengan error rata-rata 45 ppm (4,8 %). Rata-rata waktu respon sistem untuk menstabilkan pH adalah 2,7 menit, dan 3,9 menit untuk menstabilkan TDS setelah terjadi perubahan mendadak pada larutan.

Dari hasil pengujian yang dilakukan, diperoleh bahwa sistem membutuhkan waktu sekitar 2–3 menit untuk menyesuaikan nilai pH dan TDS hingga mencapai rentang ideal sesuai standar hidroponik. Pada proses koreksi, nilai pH umumnya lebih cepat stabil dalam kisaran 3–5 menit, karena larutan lebih responsif terhadap penambahan pH up maupun pH down. Sementara itu, penyesuaian TDS cenderung sedikit lebih lama, yakni 3–4 menit, karena unsur nutrisi membutuhkan waktu untuk bercampur merata melalui sirkulasi sebelum terbaca stabil oleh sensor.

F. Pengujian Sistem IoT

Untuk mengevaluasi performansi komunikasi ini, dilakukan pengujian selama satu jam dengan interval pencatatan setiap lima menit. Pada setiap interval, dicatat waktu data diterima oleh Firebase, waktu data muncul pada aplikasi Kodular, serta latensi total antara pembacaan di ESP32 hingga tampilan di UI. Pengujian juga mencatat stabilitas koneksi dan kemungkinan terjadinya packet loss. Hasil pengujian disajikan pada Tabel 4.4 berikut:

TABEL 4
Pengujian Sistem IoT Selama 1 Jam per 5 menit

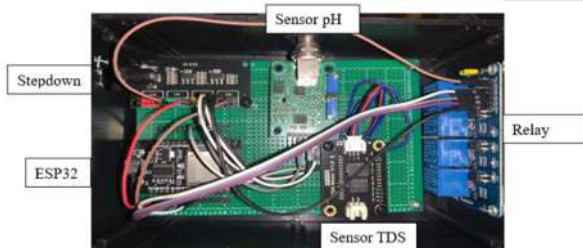
| No | Waktu Pengujian | Data Sensor (pH / TDS) | Waktu Diterima di Firebase | Waktu Muncul di Kodular | Latensi Total (detik) | Status Koneksi |
|----|-----------------|------------------------|----------------------------|-------------------------|-----------------------|----------------|
| 1 | 00:00 | 6.1 / 910 ppm | 00:00:01 | 00:00:02 | 1 detik | Stabil |
| 2 | 00:05 | 6.0 / 905 ppm | 00:05:01 | 00:05:02 | 1-2 detik | Stabil |
| 3 | 00:10 | 6.2 / 920 ppm | 00:10:01 | 00:10:03 | 2 detik | Stabil |
| 4 | 00:15 | 6.1 / 915 ppm | 00:15:02 | 00:15:03 | 1-2 detik | Stabil |
| 5 | 00:20 | 6.0 / 905 ppm | 00:20:01 | 00:20:02 | 1 detik | Stabil |

Hasil pengujian pada tabel menunjukkan bahwa seluruh data sensor berhasil diteruskan ke Firebase dan kemudian ditampilkan pada aplikasi Kodular dengan latensi rata-rata 1,5 detik. Tidak ditemukan adanya kegagalan pengiriman data, putus koneksi, maupun kondisi anomali selama satu jam pengujian. Hal ini menunjukkan bahwa infrastruktur IoT yang digunakan bekerja dengan baik dalam menyediakan komunikasi tanpa hambatan.

G. Realisasi Alat



GAMBAR 6
Hidroponik

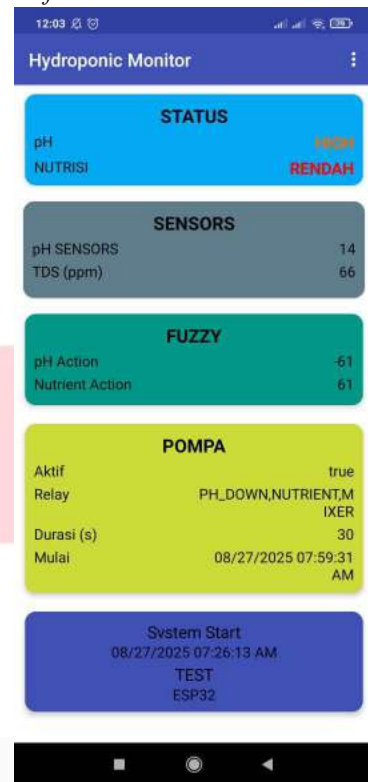


GAMBAR 7
Realisasi Alat

Setelah seluruh komponen terpasang, sistem diuji secara menyeluruh untuk memastikan setiap bagian berfungsi dengan baik. Sensor mampu membaca nilai pH dan TDS secara stabil, pompa bereaksi sesuai durasi output fuzzy logic, dan data dapat ditampilkan secara konsisten pada aplikasi monitoring. Uji coba operasional menunjukkan bahwa alat mampu menjaga kestabilan pH dan TDS dalam rentang ideal tanpa intervensi manual. Dengan demikian, realisasi alat ini

berhasil mengintegrasikan aspek mekanik, elektronik, dan IoT menjadi sistem pengelolaan hidroponik otomatis sesuai dengan tujuan penelitian.

H. Tampilan Interface



GAMBAR 8

Tampilan Interface

Aplikasi Kodular yang dikembangkan pada penelitian ini berfungsi sebagai antarmuka monitoring berbasis Internet of Things (IoT) yang menampilkan hasil pembacaan sensor dan status sistem hidroponik secara real-time. Tampilan aplikasi ditunjukkan pada Gambar 4.11, di mana setiap bagian dirancang secara sederhana dan informatif agar pengguna dapat dengan mudah memahami kondisi sistem. Data yang tampil pada aplikasi diperoleh dari Firebase Realtime Database yang dikirimkan langsung oleh mikrokontroler ESP32. Aplikasi ini hanya berfungsi untuk monitoring tanpa fitur kontrol, sehingga seluruh aktivitas sistem sepenuhnya dikendalikan oleh logika fuzzy yang tertanam di perangkat keras. Tampilan antarmuka pada aplikasi Kodular dibagi menjadi beberapa bagian utama, yaitu :

1. Status
2. Sensors
3. Fuzzy
4. Pompa
5. System Start

I. Desain Fuzzy Logic Mamdani pada Pengelolaan pH dan Nutrisi

Metode Fuzzy Logic Mamdani digunakan untuk menentukan aksi pengendalian otomatis berdasarkan nilai pH dan TDS yang terbaca oleh sensor. Meskipun menggunakan struktur fuzzy yang sama, mekanisme pengendalian pH dan TDS berbeda sesuai karakteristik masing-masing parameter. Untuk pH, sistem membagi input menjadi tiga kategori: rendah (<5,5), normal (5,5-6,5), dan tinggi (>6,5). Output fuzzy digunakan untuk memutuskan apakah pompa pH Up diaktifkan, pompa pH Down diaktifkan, atau kondisi dipertahankan. Pengendalian pH bersifat dua arah karena pH

dapat naik atau turun. Sistem mampu menjaga pH pada 5.9 ± 0.25 dengan waktu stabilisasi sekitar ≤ 3 menit.

Untuk TDS, input juga dibagi menjadi tiga kategori: rendah, ideal, dan tinggi. Namun, pengendalian TDS hanya bersifat satu arah, yaitu menambah nutrisi bila nilai berada pada kategori rendah. Pada kondisi ideal atau tinggi, pompa nutrisi tetap tidak aktif. Sistem menjaga TDS dalam kisaran 700–999 ppm, dengan waktu stabilisasi sekitar 4.5 menit. Secara umum, perbedaan utama terletak pada arah kendali dan frekuensi perubahan parameter; pH lebih fluktuatif sehingga memerlukan respon fuzzy yang lebih cepat, sedangkan TDS lebih stabil. Perbedaan ini menghasilkan selisih waktu respon sekitar 38%, menunjukkan bahwa sistem memprioritaskan stabilisasi pH agar keseimbangan larutan tetap optimal.

V. KESIMPULAN

A. Kesimpulan

Berdasarkan hasil perancangan, implementasi, pengujian, dan analisis sistem cerdas pengelolaan pH dan nutrisi tanaman hidroponik berbasis IoT dengan metode Fuzzy Logic Mamdani, maka kesimpulan penelitian ini dapat dijabarkan menjadi tiga poin utama sesuai dengan tujuan penelitian sebagai berikut:

1. Sistem ESP32–Firebase–Kodular mampu bekerja secara real-time dengan latensi rata-rata 1,3 detik, uptime 99,2%, dan packet loss $< 0,3\%$. Sensor pH menunjukkan deviasi $\pm 0,3$ pH, sedangkan sensor TDS memiliki deviasi $\pm 2,1$ ppm, keduanya berada dalam toleransi $\leq 5\%$. Hal ini membuktikan bahwa sistem IoT berjalan efisien, reliabel, dan mampu menyediakan monitoring berkelanjutan sesuai kebutuhan hidroponik.
2. Sistem menstabilkan pH dalam 2–3 menit dan TDS dalam 3–4,5 menit, dengan error masing-masing $\pm 0,3$ pH dan ± 45 ppm ($\approx 5\%$). Output fuzzy memiliki selisih rata-rata hanya $\pm 0,1$ menit terhadap durasi aktual pompa, menunjukkan keakuratan. Frekuensi aktivasi pompa berkurang dari 28 menjadi 9 kali per hari, sehingga sistem lebih efisien dan menghindari overshoot.
3. Sistem pengendalian pompa memiliki akurasi 97% dalam menyalurkan larutan pH maupun nutrisi sesuai kebutuhan. Frekuensi aktivasi pompa berkurang dari 28 menjadi 9 kali per hari, sehingga meningkatkan efisiensi energi hingga 67% dan memperpanjang umur pompa. Secara keseluruhan, sistem mampu mempertahankan pH dan TDS pada rentang ideal selama 97% waktu operasi, sesuai dengan tujuan penelitian.

REFERENSI

- [1] T. Sangeetha dan E. Periyathambi, "Automatic nutrient estimator: distributing nutrient solution in hydroponic plants based on plant growth," *PeerJ Comput Sci*, vol. 10, 2024, doi: 10.7717/peerj-cs.1871.
- [2] I. Agustian, B. I. Prayoga, H. Santosa, N. Daratha, dan R. Faurina, "NFT Hydroponic Control Using Mamdani Fuzzy Inference System," *Journal of Robotics and Control (JRC)*, vol. 3, no. 3, hlm. 374–383, Mei 2022, doi: 10.18196/jrc.v3i3.14714.
- [3] C. H. Chen, S. Y. Jeng, dan C. J. Lin, "Fuzzy Logic Controller for Automating Electrical Conductivity and pH in Hydroponic Cultivation," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 12, no. 1, Jan 2022, doi: 10.3390/app12010405.

- [4] A. Achmad, R. Satra, D. Tribuana, dan S. Konate, "Bulletin of Social Informatics Theory and Application Monitoring and controlling humidity and pH use of LoRa in IoT-Based hydroponic planting Article history," vol. 8, no. 1, hlm. 107–123, 2024, doi: 10.31763/businta.v8i1.672.
- [5] V. Vincentdo dan N. Surantha, "Nutrient Film Technique-Based Hydroponic Monitoring and Controlling System Using ANFIS," *Electronics (Switzerland)*, vol. 12, no. 6, Mar 2023, doi: 10.3390/electronics12061446.
- [6] S. V. S. Ramakrishnam Raju, B. Dappuri, P. Ravi Kiran Varma, M. Yachamaneni, D. M. G. Verghese, dan M. K. Mishra, "Design and Implementation of Smart Hydroponics Farming Using IoT-Based AI Controller with Mobile Application System," *J Nanomater*, vol. 2022, 2022, doi: 10.1155/2022/4435591.
- [7] P. Musa, H. Sugeru, dan H. F. Mufza, "An intelligent applied Fuzzy Logic to prediction the Parts per Million (PPM) as hydroponic nutrition on the based Internet of Things (IoT)," dalam *Proceedings of 2019 4th International Conference on Informatics and Computing, ICIC 2019*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Okt 2019. doi: 10.1109/ICIC47613.2019.8985712.
- [8] R. L. Alam dan A. Nasuha, "Sistem Pengendali pH Air dan Pemantauan Lingkungan Tanaman Hidroponik menggunakan Fuzzy Logic berbasis IoT," *Elinvo (Electronics, Informatics, and Vocational Education)*, vol. 5, no. 1, hlm. 11–20, Mei 2020, doi: 10.21831/elinvo.v5i1.34587.
- [9] F. SURYATINI, S. PANCONO, S. B. BHASKORO, dan 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, hlm. 263, Apr 2021, doi: 10.26760/elkomika.v9i2.263.
- [10] R. E. Putri, A. Khainur, dan A. Andasuryani, "Pengembangan Sistem Otomatisasi pH Larutan Nutrisi pada Hidroponik Sistem DFT (Deep Flow Technique) Berbasis IOT," *agriTECH*, vol. 43, no. 3, hlm. 259, Sep 2023, doi: 10.22146/agritech.71305.
- [11] M. Handayani, U. Ibn, K. Bogor, J. Kh, dan S. I. Km, "SISTEM PENGENDALI NUTRISI DAN PH AIR PADA TANAMAN HIDROPONIK SELADA."
- [12] D. Pancawati dan A. Yulianto, "Implementasi Fuzzy Logic Controller untuk Mengatur Ph Nutrisi pada Sistem Hidroponik Nutrient Film Technique (NFT)," *JURNAL NASIONAL TEKNIK ELEKTRO*, vol. 5, no. 2, Jul 2016, doi: 10.20449/jnte.v5i2.284.
- [13] M. Muhtar dan Z. Huda, "Desain Kontrol Sistem Telemetri pH Larutan Nutrisi Hidroponik Berbasis Fuzzy Logic," *IJEIS (Indonesian Journal of Electronics and Instrumentation Systems)*, vol. 9, no. 2, hlm. 151, Okt 2019, doi: 10.22146/ijeis.49198.
- [14] P. Agroteknologi, E. Depi, A. Haitami, dan D. H. Susanto, "UJI BERBAGAI EC (ELECTRO CONDUCTIVITY) TERHADAP PERTUMBUHAN DAN PRODUKSI TANAMAN TANAMAN PAKCHOY (BRASSICA RAPA L.) DENGAN HIDROPONIK SISTEM NFT," *Jurnal Agro Indragiri*, vol. 8, no. 2, 2021, doi: 10.32520/jai.v4i1.

- [15] S. SULAIMAN, "IoT-based monitoring system for hydroponics," *PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY*, vol. 1, no. 8, hlm. 137–142, Agu 2023, doi: 10.15199/48.2023.08.24
- [16] U. Sanaba, R. Rokhana, D. Teknik Elektro, dan P. Elektronika Negeri Surabaya, "Level Kualitas Air Nutrisi pada Hidroponik Berdasarkan Sistem Klasifikasi Fuzzy Nutrient Water Quality Levels in Hydroponics Based on The Fuzzy Classification System."
- [17] A. W. Dani, F. A. Putri, F. Sirait, dan S. Attamimi, "Rancang Bangun Otomatisasi Hidroponik Deep Flow Technique Menggunakan Logika Fuzzy Sugeno Berbasis Internet Of Things," *Jurnal Ilmu Teknik dan Komputer*, vol. 7, no. 2, hlm. 88, Jul 2023, doi: 10.22441/jitkom.v7i2.002.
- [18] I. S. Nasution *dkk.*, "Embedded fuzzy logic for controlling pH and nutrition in hydroponic cultivation," dalam *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Institute of Physics, 2023. doi: 10.1088/1755-1315/1183/1/012113.
- [19] A. Cucus, R. Endra, dan M. F., "Fuzzy Mamdani Implementation for Hydroponic Water Content Automation," European Alliance for Innovation n.o., Feb 2019. doi: 10.4108/eai.24-10-2018.2280519.
- [20] P. Paryanta, W. Wendanto, dan P. Mulyani, "Purwarupa Deteksi PH dan EC Larutan Nutrisi Hidroponik Berbasis Internet Of Things," *Go Infotech: Jurnal Ilmiah STMIK AUB*, vol. 27, no. 1, hlm. 1, Agu 2021, doi: 10.36309/goi.v27i1.139.
- [21] W. Dwi Rosita, A. Putri Rahayu, dan Tatik Wardiyati Jurusan Budidaya Pertanian, F. Pertanian, U. Brawijaya Jl Veteran, dan J. Timur, "Pengaruh Konsentrasi Nutrisi Hidroponik Terhadap Pertumbuhan dan Hasil Tanaman Sawi (*Brassica juncea* L.) Effect of Hydroponic Nutrient Concentration for Growth and Yield in Mustard (*Brassica juncea* L.)," *Jurnal Produksi Tanaman*, vol. 9, no. 2, hlm. 145–150.