

SISTEM KENDALI PADA MEDIA TANAM HIDROPONIK SELADA BERBASIS *FINITE STATE MACHINE* (FSM)

Fioni Puspa Sari¹, Tedy Rismawan¹, Kartika Sari¹

¹Jurusan Rekayasa Sistem Komputer, Fakultas MIPA, Universitas Tanjungpura, Pontianak, Indonesia

Penulis korespondensi, E-mail:kartika.sari@siskom.untan.ac.id

Abstrak

Pengelolaan parameter lingkungan merupakan tantangan utama dalam budidaya selada (*Lactuca sativa L.*) pada sistem hidroponik rakit apung. Penelitian ini mengembangkan sistem kendali otomatis berbasis *Finite State Machine* (FSM) untuk menjaga stabilitas media tanam secara deterministik. Sistem ini mengintegrasikan mikrokontroler ESP32 dengan sensor ultrasonik, TDS, dan suhu untuk memantau ambang batas operasional yang ditetapkan, yaitu konsentrasi jarak air 3 cm, nutrisi 560-840 ppm dan suhu larutan 26°C. Fokus utama penelitian ini adalah penyelesaian konflik instruksi atau *multi-objective* melalui perancangan transisi *state* yang terstruktur, guna memastikan efektivitas sistem saat menghadapi penyimpangan parameter secara bersamaan. Metodologi pengujian melibatkan verifikasi logika menggunakan JFLAP dan pengujian *real-time* terhadap berbagai skenario. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem memiliki akurasi sensor yang tinggi dengan persentase kesalahan masing-masing sebesar 2.06% untuk sensor ultrasonik, 0.55% untuk sensor TDS, dan 0,247% untuk sensor suhu. Validasi akhir terhadap seluruh skenario perencanaan memiliki efektivitas sebesar 100%, di mana seluruh transisi *state* dieksekusi secara tepat sesuai dengan rancangan logika tanpa adanya ketidakpastian atau kegagalan sistem. Implementasi metode FSM ini terbukti andal dalam meningkatkan efisiensi pemeliharaan hidroponik melalui pengawasan parameter yang akurat dan responsif.

Kata kunci: Hidroponik, Finite State Machine, ESP32, Sistem Kendali, Kendali Multi-Parameter.

Abstract

Environmental parameter management is a major challenge in lettuce (*Lactuca sativa L.*) cultivation in floating raft hydroponic systems. This study developed an automatic control system based on Finite State Machine (FSM) to maintain the stability of the growing medium deterministically. This system integrates an ESP32 microcontroller with ultrasonic, TDS, and temperature sensors to monitor the set operational thresholds, namely a water distance concentration of 3 cm, nutrients of 560-840 ppm, and a solution temperature of 26°C. The main focus of this research is to resolve instruction conflicts or multi-objectives through structured state transition design to ensure the system's effectiveness when facing simultaneous parameter deviations. The testing methodology involves logic verification using JFLAP and real-time testing of various scenarios. The results show that the system has high sensor accuracy with an error percentage of 2.06% for the ultrasonic sensor, 0.55% for the TDS sensor, and 0.247% for the temperature sensor. Final validation of all planning scenarios showed 100% effectiveness, where all state transitions were executed precisely according to the logic design without any uncertainty or system failure. The implementation of this FSM method has proven to be reliable in improving the efficiency of hydroponic maintenance through accurate and responsive parameter monitoring.

Keywords: Hydroponics, Finite State Machine, ESP32, Control System, Multi-objective Control.

1. Pendahuluan

Peningkatan populasi global yang tidak sejalan dengan ketersediaan lahan pertanian telah memicu krisis pangan dan mendorong alih fungsi lahan menjadi kawasan industri serta pemukiman, khususnya di Indonesia [1]. Sebagai solusi atas keterbatasan lahan di wilayah perkotaan, sistem

hidroponik, terutama teknik rakit apung (*floating raft system*), menjadi alternatif metode budidaya yang efisien [2]. Komoditas seperti selada (*Lactuca sativa L.*) sangat cocok untuk metode ini, namun tanaman ini menuntut kondisi lingkungan yang spesifik, meliputi konsentrasi nutrisi pada rentang 560–840 ppm [3] dan suhu larutan antara 20°C–27°C untuk pertumbuhan optimal [4].

Tantangan utama dalam otomatisasi hidroponik adalah adanya ketergantungan (*interdependencies*) dan timbal balik (*trade-offs*) antar parameter lingkungan yang sering diabaikan oleh sistem kendali konvensional [5] dan berpotensi memicu konflik instruksi (*multi-objective*) pada aktuator jika terjadi secara bersamaan [6]. Tanpa adanya logika transisi yang terstruktur, sistem kendali rentan mengalami ketidakstabilan atau kesalahan eksekusi saat menghadapi fluktuasi parameter yang kompleks tersebut.

Penelitian terkait yang sebelumnya dilakukan berjudul “*Smart Coffee Maker* berbasis IoT” [7], sistem ini memanfaatkan FSM untuk mengatur alur kerja mesin. Fokus utama adalah akurasi takaran bahan dengan tingkat error rendah. Namun, penelitian ini belum menyertakan validasi transisi *state* dari simulasi *software* JFLAP ke dalam perangkat keras. Tanpa adanya bukti pengujian tersebut, keandalan rancangan untuk menangani seluruh skenario pengujian saat dijalankan pada sistem belum dapat dipastikan.

Penelitian berikutnya yang dilakukan berjudul “Sistem *Monitoring* dan Kendali Hidroponik *Indoor* berbasis *Website*” [8] yang mengintegrasikan beberapa parameter untuk meningkatkan pertumbuhan selada. Hasil penelitian tersebut menunjukkan peningkatan kualitas tanaman yang signifikan, namun ketergantungan pada koneksi *internet* menimbulkan isu latensi yang menghambat respons sistem.

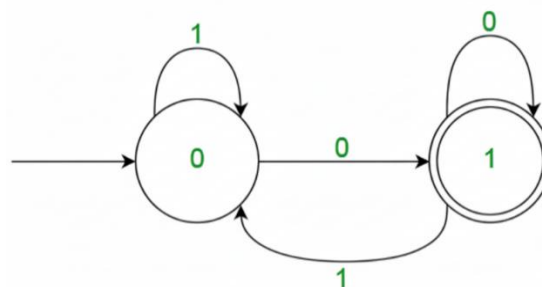
Penelitian terbaru yang berjudul “Kendali Otomatis Tingkat Ketinggian Air dan Nutrisi pada Hidroponik menggunakan *Finite State Machine*” [9] menerapkan metode FSM berbasis Arduino Uno untuk mengendalikan ketinggian air (cm) dan konsentrasi nutrisi (ppm). Sistem ini beroperasi melalui empat *state* utama, yaitu *Idle*, Siaga Air, Siaga Nutrisi, Normal, Siaga Darurat. Namun, penelitian ini memiliki terbatas pada dua parameter dan belum mencakup pengendalian suhu larutan yang dibutuhkan untuk respirasi akar. Selain itu, validasi implementasi rancangan FSM dari simulasi JFLAP ke perangkat keras juga belum disertakan.

Berdasarkan penelitian sebelumnya, penelitian ini mengembangkan sistem kendali otomatis berbasis *Finite State Machine* (FSM) menggunakan mikrokontroler ESP32 yang beroperasi secara mandiri. Pendekatan ini dirancang untuk menyelesaikan konflik *multi-objective* melalui mekanisme transisi *state* yang deterministik, sehingga sistem dapat mengeksekusi aktuator secara tepat saat terjadi fluktuasi suhu, nutrisi, dan jarak air secara bersamaan. Dengan demikian, stabilitas media tanam dapat terjaga secara optimal.

2. Metode

2.1. Finite State Machine (FSM)

FSM adalah model matematis komputasi yang dapat berada dalam tepat satu dari sekumpulan *state* yang jumlahnya terbatas pada suatu waktu tertentu. FSM dapat melakukan transisi, yaitu perpindahan dari satu *state* ke *state* lain, sebagai respons terhadap *input* yang diterima sistem [10]. Berdasarkan karakteristik transisinya, FSM diklasifikasikan menjadi dua jenis, yaitu *Deterministic Finite Automaton* (DFA) dan *Non-deterministic Automaton* (NFA). Mesin DFA didasarkan pada konsep 5-tuple [11]. DFA ditunjukkan pada Gambar 1 dan 5-tuple ditunjukkan pada Tabel 1



Gambar 1. Gambar DFA

$$M = (Q, \Sigma, \delta, S, \Delta, \lambda) \quad (1)$$

Tabel 1. Simbol 5-tuple

Simbol	Keterangan
Q	himpunan <i>state</i> , $Q \neq \emptyset$
Σ	Himpunan simbol <i>input</i> / masukan
δ	fungsi transisi, $\delta: Q \times \Sigma \rightarrow Q$
S	<i>state</i> awal/ <i>initial state</i> , $S \subseteq Q$
λ	Fungsi <i>output</i> / keluaran

Dalam algoritma DFA, sistem akan terus memproses pembacaan sensor dan input secara berurutan, dan ketika pola kondisi terdeteksi sistem akan membangun transisi antar *state* yang sesuai hingga seluruh perilaku sistem kontrol tergambar secara lengkap dalam *model* DFA yang dihasilkan [12].

2.2. Hidroponik

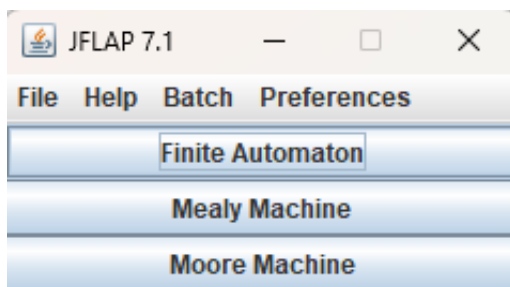
Salah satu model yang umum digunakan adalah sistem rakit apung (*floating raft*), dimana teknik ini menempatkan akar tanaman terendam langsung di dalam bak larutan nutrisi. Secara teknis, tanaman ditempatkan pada papan penyangga di atas wadah penampung yang telah berisi formulasi nutrisi AB Mix [13].

2.3. Selada

Selada (*Lactuca sativa L.*) merupakan tanaman sayuran semusim yang kaya akan kandungan mineral dan kandungan gizi bermanfaat, sehingga memerlukan suplai hara untuk mencapai pertumbuhan optimal [14]. Penyerapan hara bergantung dengan menjaga dosis nutrisi untuk tanaman selada dengan kisaran antara 560-840 ppm [3]. Selain nutrisi, suhu larutan disekitar akar harus dipertahankan pada tingkat yang rendah untuk menjamin kadar oksigen terlarut tetap tinggi, dengan rentang suhu ideal antara 20°C - 27°C [4].

2.4. Java Formal Language and Automata Package

JFLAP adalah perangkat lunak antarmuka grafis yang digunakan untuk merancang dan mensimulasikan model otomata, seperti DFA, dalam bentuk *diagram state*. Alat ini berfungsi memvalidasi FSM dengan mendefinisikan model dan himpunan *input* yang diterima, sehingga memastikan struktur transisi sistem telah sesuai dengan spesifikasi sebelum diimplementasikan ke perangkat keras [15]. JFLAB ditunjukkan pada Gambar 2



Gambar 2. JFLAP

2.5. Analisis Kebutuhan

Tahap ini dilakukan dengan mengidentifikasi spesifikasi kebutuhan untuk sistem yang dibangun, yang terbagi menjadi kebutuhan perangkat lunak dan perangkat keras. Adapun kebutuhan perangkat lunak meliputi *Arduino Integrated Development Environment (IDE)* sebagai platform untuk menulis program dan mengunggah kode ke mikrokontroler [16], serta perangkat lunak JFLAP yang digunakan untuk merancang, memvisualisasikan, dan mensimulasikan validitas logika FSM sebelum diimplementasikan [15].

Selanjutnya, kebutuhan perangkat keras berpusat pada ESP32 DOIT DevKit V1 sebagai unit pemroses utama yang menjalankan algoritma FSM [17]. Untuk pemantauan parameter lingkungan, sistem menggunakan sensor ultrasonik HC-SR04 guna mengukur ketinggian air [18], sensor TDS untuk mendeteksi konsentrasi nutrisi [19], dan sensor DS18B20 untuk memantau suhu larutan dengan akurasi tinggi [20].

Sistem kendali ini juga dilengkapi dengan *modul Relay 4-channel* yang berfungsi sebagai saklar elektronik [21] untuk mengoperasikan aktuator, yaitu pompa DC untuk sirkulasi fluida [22] dan elemen *Peltier* sebagai sistem pendingin aktif [23]. Seluruh status operasional ditampilkan melalui LCD 20×4 sebagai antarmuka *visual* [24], dengan dukungan daya dari *Power Supply* untuk menjamin stabilitas tegangan [25].

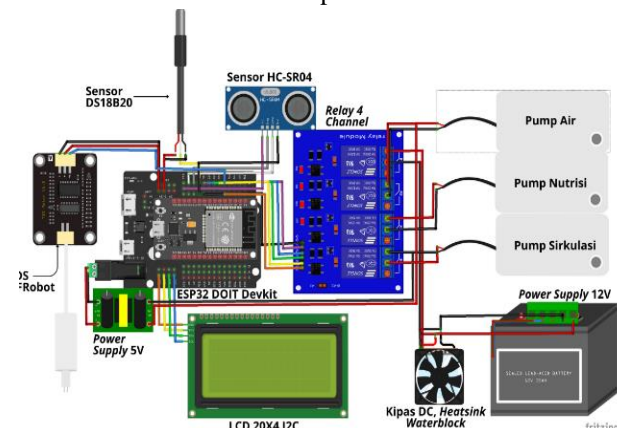
3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Perancangan Sistem

Tahap perancangan sistem dilakukan untuk menerapkan spesifikasi kebutuhan optimal tanaman selada pada model FSM. Arsitektur yang dibangun mencakup pemilihan komponen perangkat dan pengembangan logika FSM yang mampu merespons dinamika perubahan jarak air, nutrisi, dan suhu secara *real-time*.

3.1.1. Perancangan Perangkat Keras

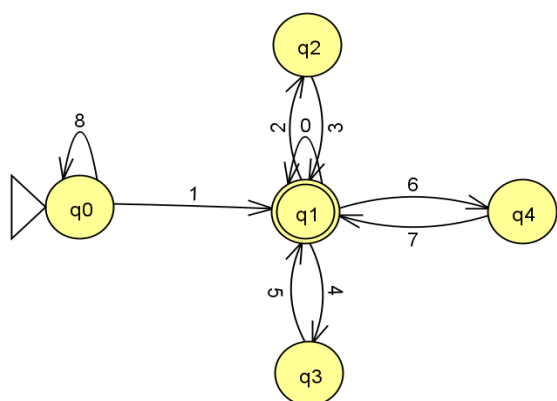
Arsitektur perangkat keras dirancang dengan mikrokontroler ESP32 sebagai unit kendali pusat yang mengelola aliran data dari blok masukan menuju blok luaran. Skema rangkaian elektronik disusun untuk menjamin stabilitas sinyal antara sensor parameter lingkungan dan aktuator penggerak, sebagaimana divisualisasikan secara rinci pada Gambar 3.



Gambar 3. Keseluruhan Sistem

3.1.2. Perancangan Perangkat Lunak

Mekanisme sistem dimodelkan dalam bentuk diagram alir untuk memetakan urutan langkah dari pembacaan input hingga tindakan penyesuaian. Diagram ini menjadi acuan utama dalam pemrograman logika mikrokontroler untuk menangani berbagai kondisi perubahan parameter, seperti ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Diagram state pada JFLAP

Setiap simbol *input* dalam sistem ini memiliki peran spesifik dalam memicu transisi antar *state* berdasarkan perancangan yang ditetapkan.

- Himpunan *State* ditunjukkan pada Tabel 2
Himpunan ini merepresentasikan kondisi operasional sistem.

Tabel 2. Himpunan *State*

State	Keterangan
q0	Init, inialisasi awal komponen
q1	Monitor, ketika kondisi optimal
q2	Water Fill, jarak air > 3.5 cm
q3	Nutrient Dose, nutrisi < 560 ppm
q4	Cooling, suhu larutan > 27 °C

- Himpunan *Input* ditunjukkan pada Tabel 3
Himpunan input diperoleh dari nilai sensor ultrasonik, TDS, dan suhu berdasarkan threshold yang telah ditetapkan (jarak air < 3 cm, nutrisi 560 ppm - 840 ppm, dan suhu > 26°C).

Tabel 3 Himpunan *Input*

Transisi	Keterangan
0	Baca sensor
1	Sensor ready
2	Jarak air > 3.5 cm
3	Jarak air ≤ 3cm
4	TDS < 560 PPM
5	560 ≤ TDS ≤ 840 PPM
6	Suhu > 27°C
7	Suhu ≤ 26°C
8	Gagal Sensor

- Fungsi Transisi ditunjukkan pada Tabel 4
Fungsi ini untuk memperjelas perpindahan antar *state* beserta kondisi yang memicunya.

Tabel 4 Fungsi Transisi

Input/ State	0	1	2	3	4	5	6	7	8
q0	q0	q1	q0	q0	q0	q0	q0	q0	q0
q1	q1	q1	q2	q1	q3	q1	q4	q1	q0
q2	q2	q2	q2	q1	q3	q2	q4	q2	q0
q3	q3	q3	q2	q3	q3	q1	q4	q3	q0
q4	q4	q4	q2	q4	q3	q4	q4	q4	q0

$$Q = \{Q0, Q1, Q2, Q3, Q4\}$$

$$\Sigma = \{0,1,2,3,4,5,6,7,8\}$$

$$\delta = \begin{aligned} \delta(Q0, 8) &= Q0 \\ \delta(Q0, 1) &= Q1 \\ \delta(Q1, 0) &= Q1 \\ \delta(Q1, 2) &= Q2 \\ \delta(Q2, 3) &= Q1 \\ \delta(Q1, 4) &= Q3 \\ \delta(Q3, 5) &= Q1 \\ \delta(Q1, 6) &= Q4 \\ \delta(Q4, 7) &= Q1 \end{aligned}$$

$$S = Q0$$

$$F = Q1$$

- Fungsi *Output* ditunjukkan pada Tabel 5
Fungsi ini merepresentasikan aksi nyata yang dilakukan sistem selama proses transisi antar *state* sebagai respons terhadap *input* tertentu.

Tabel 5. Fungsi *Output*

Output	Keterangan
0	Matikan semua relay (A4), Tampilkan status aksi di LCD (A5), Serial Monitoring (A6),
1	Aktifkan pompa air (A1), Tampilkan status aksi di LCD (A5), Serial Monitoring (A6),
2	Aktifkan pompa nutrisi (A2), Tampilkan status aksi di LCD (A5), Serial Monitoring (A6)
3	Aktifkan sistem pendingin (A3), Tampilkan status aksi di LCD (A5), Serial Monitoring (A6).

$$\lambda = \lambda(Q0, 1) = 0$$

$$\lambda(Q0, 8) = 0$$

$$\lambda(Q1, 0) = 0$$

$$\lambda(Q1, 0) = 0$$

$$\lambda(Q1, 2) = 1$$

$$\lambda(Q1, 5) = 0$$

$$\lambda(Q1, 6) = 3$$

$$\lambda(Q2, 3) = 0$$

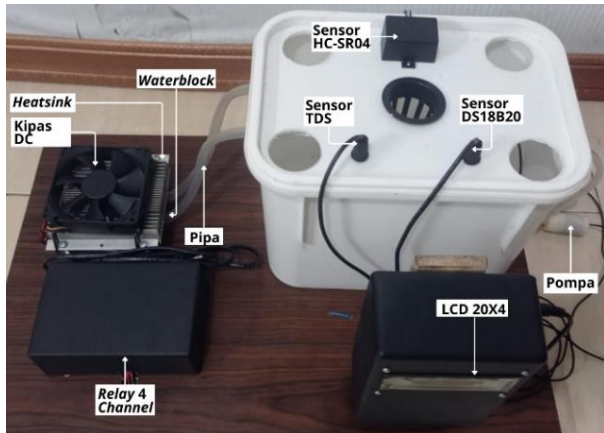
$$\lambda(Q3, 4) = 2$$

$$\lambda(Q4, 7) = 0$$

3.2. Implementasi Sistem

Tahap implementasi merupakan fase di mana rancangan sistem monitoring dan kendali otomatis berbasis FSM untuk budidaya hidroponik selada diterapkan secara nyata pada media tanam. Pada tahap ini, seluruh komponen perangkat keras seperti mikrokontroler Espressif Systems, sensor ultrasonik, sensor TDS, dan sensor suhu diintegrasikan ke dalam satu kesatuan sistem yang mampu bekerja sesuai dengan alur logika FSM yang telah disusun. Tujuan utama tahap ini adalah memastikan bahwa sistem mampu mengatur parameter lingkungan penting secara otomatis, termasuk menjaga ketinggian air, konsentrasi nutrisi larutan (TDS), serta suhu media tanam agar tetap

berada dalam rentang ideal bagi pertumbuhan selada. Gambar 5. Merupakan implementasi komponen perangkat keras sistem.

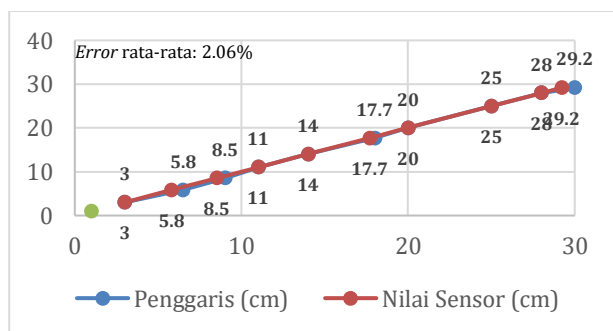


Gambar 5. Implementasi Komponen Perangkat Keras

3.3. Pengujian dan Hasil

3.3.1. Pengujian Sensor HC-SR04

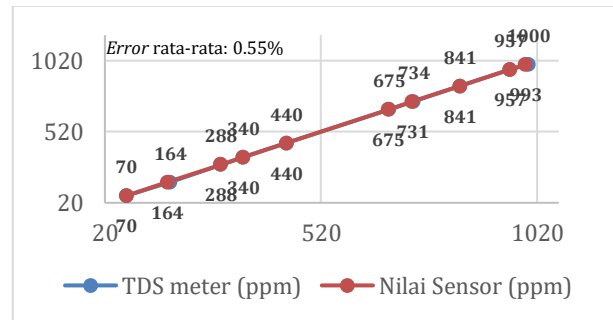
Pengujian sensor HC-SR04 dilakukan untuk memverifikasi akurasi pembacaan jarak air dalam satuan cm seperti ditunjukkan pada Gambar 6. Proses kalibrasi melibatkan perbandingan data sensor pada ESP32 terhadap pengukuran manual menggunakan penggaris sebagai standar referensi.



Gambar 6. Hasil Pengujian Sensor HC-SR04

3.3.2. Pengujian Sensor TDS DFRobot

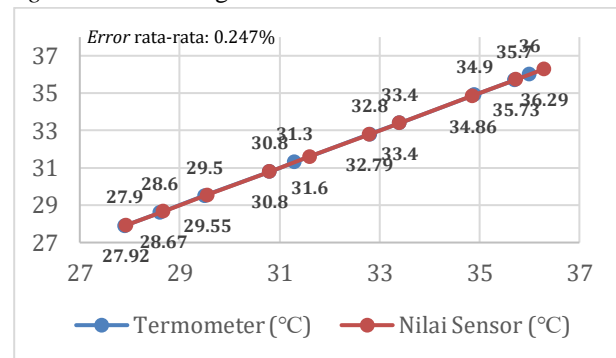
Pengujian sensor *Total Dissolved Solids* (TDS) bertujuan memastikan akurasi deteksi konsentrasi nutrisi dalam satuan ppm seperti ditunjukkan pada Gambar 8. Kalibrasi dilakukan dengan membandingkan pembacaan sensor DFRobot terhadap TDS meter digital standar.



Gambar 7. Hasil Pengujian Sensor TDS DFRobot

3.3.3. Pengujian Sensor DS18B20

Pengujian sensor suhu DS18B20 dilakukan untuk menjamin keakuratan sistem dalam memantau fluktuasi suhu larutan nutrisi. Validasi data dilakukan melalui perbandingan pembacaan sensor dengan termometer digital standar sebagai referensi akurasi.



Gambar 8. Hasil Pengujian Sensor DS18B20

3.3.4. Pengujian Transisi JFLAP

Pengujian pada JFLAP ditunjukkan pada Gambar 9, pengujian ini bertujuan untuk memverifikasi logika *Finite Automaton* sebagai *transducer* kontrol hidroponik. Melalui simulasi *Multiple Run*, sistem diuji untuk memproses urutan *input* sensor menjadi *output string* aksi aktuator sesuai spesifikasi.

Input	Result
10	Accept
1023	Accept
1045067	Accept
10230	Accept
1067067	Accept
1023045	Accept
10670	Accept

Gambar 9. Hasil Pengujian Skenario JFLAP

Detail skenario pengujian beserta urutan *input* dan hasil transisinya disajikan pada Tabel 6.

Tabel 6. Keterangan Skenario

No	Keterangan Proses	Input	Hasil
1.	- Sistem dihidupkan, inisialisasi sensor berhasil, sistem masuk ke <i>mode monitoring</i> dan membaca sensor secara berkala dalam kondisi optimal.	10	Diterima
2.	- Inisialisasi berhasil, sistem mendeteksi jarak air rendah (> 3.5 cm), mengaktifkan pompa air hingga volume air kembali dalam keadaan optimal (≤ 3 cm)	1023	Diterima
3.	- Inisialisasi berhasil, mendeteksi kadar nutrisi rendah (< 560 PPM), mengaktifkan pompa nutrisi hingga kadar PPM kembali optimal, dilanjutkan deteksi suhu tinggi (> 27°C) dan mengaktifkan pendingin hingga stabil.	1045067	Diterima
4.	- Inisialisasi berhasil, mendeteksi jarak air rendah, pompa air aktif hingga optimal, sistem kembali ke <i>mode monitoring</i> dan membaca sensor secara stabil.	10230	Diterima

5.	- Inisialisasi berhasil, mendeteksi suhu tinggi, pendingin aktif hingga suhu optimal, sistem kembali <i>monitor</i> namun suhu naik kembali sehingga pendingin aktif ulang hingga optimal.	1067067	Diterima
6.	- Inisialisasi berhasil, mendeteksi air rendah, melakukan pengisian air hingga optimal, kembali ke <i>mode monitoring</i> lalu mendeteksi nutrisi rendah dan melakukan dosis nutrisi hingga optimal.	1023045	Diterima
7.	- Inisialisasi berhasil, mendeteksi suhu larutan naik, sistem mengaktifkan sistem pendingin hingga suhu kembali optimal, lalu kembali ke status siaga.	10670	Diterima

Hasil simulasi menunjukkan bahwa seluruh skenario mendapatkan status 'Diterima', yang mengonfirmasi bahwa setiap urutan *input* berhasil mencapai *state* akhir dengan benar. Hal ini membuktikan validitas *model* FSM untuk diimplementasikan ke dalam sistem kontrol hidroponik yang sebenarnya.

3.3.5. Pengujian Keseluruhan Sistem

Pengujian dilakukan untuk memastikan kinerja sistem hidroponik dalam membaca parameter lingkungan, mengendalikan aktuator, serta memverifikasi transisi *state* sesuai aturan FSM yang dirancang. Pengujian keseluruhan sistem dapat dilihat pada Tabel 7.

Tabel 7. Hasil Pengujian Keseluruhan Sistem

No	Jarak (cm)	Suhu (°C)	TDS (ppm)	Pump Air	Pump Nutrisi	Peltier	Pump peltier	State
1	3.9	28.5	757	ON	OFF	OFF	OFF	Water Refill
2	3.6	28.5	742	ON	OFF	OFF	OFF	Water Refill
3	2.6	27.1	715	OFF	OFF	OFF	OFF	Monitor
4	2.6	26.7	695	OFF	OFF	ON	ON	Cooling
5	2.6	26.1	679	OFF	OFF	ON	ON	Cooling
6	2.6	25.9	670	OFF	OFF	ON	ON	Cooling
7	2.6	25.9	661	OFF	OFF	ON	ON	Cooling
8	2.6	26	632	OFF	OFF	ON	ON	Cooling
9	2.6	25.9	615	OFF	OFF	ON	ON	Cooling
10	2.6	25.9	425	OFF	OFF	ON	ON	Cooling
11	2.6	25.8	245	OFF	OFF	OFF	OFF	Monitor
12	2.6	25.9	317	OFF	OFF	OFF	OFF	Monitor
13	2.6	25.9	411	OFF	ON	OFF	OFF	Nutrient Dose
14	2.6	25.9	463	OFF	ON	OFF	OFF	Nutrient Dose
15	2.6	25.9	506	OFF	ON	OFF	OFF	Nutrient Dose
16	2.6	25.9	529	OFF	ON	OFF	OFF	Nutrient Dose
17	2.6	25.9	569	OFF	ON	OFF	OFF	Nutrient Dose
18	2.6	25.9	600	OFF	ON	OFF	OFF	Nutrient Dose
19	2.6	25.9	640	OFF	ON	OFF	OFF	Nutrient Dose
20	3	26.6	681	OFF	OFF	OFF	OFF	Monitor
21	3.3	26.1	682	OFF	OFF	ON	ON	Cooling
22	3.2	26.1	678	OFF	OFF	ON	ON	Cooling
23	3.5	26.1	674	OFF	OFF	ON	ON	Cooling
24	3.5	25.9	672	OFF	OFF	ON	ON	Cooling
25	4	25.9	668	OFF	OFF	ON	ON	Cooling
26	4.9	25.9	669	OFF	OFF	OFF	OFF	Monitor
27	6.8	25.9	664	OFF	OFF	OFF	OFF	Monitor
28	5.2	25.9	662	ON	OFF	OFF	OFF	Water Refill
29	4.6	25.9	661	ON	OFF	OFF	OFF	Water Refill
30	3	25.9	659	ON	OFF	OFF	OFF	Water Refill

Berdasarkan hasil pengujian, mekanisme klasifikasi *state* bekerja sesuai harapan, di mana sistem mampu berpindah antar *state* berdasarkan kondisi sensor yang terdeteksi, kemudian mengeksekusi aksi pengendalian aktuator yang sesuai pada setiap *state*. Seluruh proses transisi, mulai dari *monitoring* sensor, identifikasi kondisi, hingga aktivasi aktuator berjalan tanpa kendala.

3.3.6. Pengujian Efektivitas FSM

Pengujian mencakup seluruh kemungkinan perubahan kondisi di dalam wadah hidroponik untuk memastikan sistem selalu memberikan respons (aksi nyata) yang sesuai. Pengujian efektivitas FSM dapat dilihat pada Tabel 8

Tabel 8. Hasil Pengujian Efektivitas FSM

No	State	Tujuan State	Aksi	cm	ppm	°C	Status
1	Monitor	Water Fill	Tidak ada	3.6	776	28.1	Sesuai
2	Monitor	Water Fill	Tidak ada	3.6	776	28.1	Sesuai
3	Water Fill	Monitor	Pompa Air	3.6	777	28.1	Sesuai
4	Water Fill	Monitor	Pompa Air	2.3	774	28.1	Sesuai
5	Monitor	Cooling	Tidak ada	2.6	776	28.1	Sesuai
6	Monitor	Cooling	Tidak ada	2.3	773	28.1	Sesuai
7	Cooling	Monitor	Sistem Pendingin	3.3	772	28.2	Sesuai
8	Cooling	Monitor	Sistem Pendingin	2.9	773	28.2	Sesuai
9	Cooling	Monitor	Sistem Pendingin	2.6	675	26	Sesuai
10	Monitor	Monitor	Tidak ada	2.6	670	26	Sesuai
11	Monitor	Monitor	Tidak ada	2.6	669	25.9	Sesuai
12	Monitor	Monitor	Tidak ada	2.6	668	25.9	Sesuai
13	Monitor	Monitor	Tidak ada	2.6	670	25.9	Sesuai
14	Monitor	Monitor	Tidak ada	2.6	670	25.9	Sesuai
15	Nutrisi Dose	Monitor	Pompa Nutrisi	3.9	501	28	Sesuai
16	Nutrisi Dose	Monitor	Pompa Nutrisi	2.9	511	27.9	Sesuai
17	Nutrisi Dose	Monitor	Pompa Nutrisi	2.9	521	27.9	Sesuai
18	Nutrisi Dose	Monitor	Pompa Nutrisi	2.9	607	27.8	Sesuai
19	Monitor	Water Fill	Tidak ada	3.9	557	27.7	Sesuai
20	Water Fill	Monitor	Pompa Air	3.9	786	28.3	Sesuai
21	Water Fill	Monitor	Pompa Air	3.9	787	28.3	Sesuai
22	Water Fill	Monitor	Pompa Air	3.3	789	28.3	Sesuai
23	Water Fill	Monitor	Pompa Air	2.6	791	28.3	Sesuai
24	Monitor	Cooling	Tidak ada	2.3	794	28.3	Sesuai
25	Monitor	Cooling	Tidak ada	2.3	804	28.3	Sesuai
26	Cooling	Monitor	Sistem Pendingin	2.3	783	28.3	Sesuai
27	Init	Monitor	Tidak ada	9.15	408	30.61	Sesuai
28	Monitor	Water Fill	Tidak ada	9.15	408	30.61	Sesuai
29	Water Fill	Monitor	Pompa Air	9.15	409	30.61	Sesuai
30	Water Fill	Monitor	Pompa Air	9.15	409	30.61	Sesuai

4. Kesimpulan

Penelitian ini berhasil mengimplementasikan sistem kendali otomatis hidroponik berbasis *Finite State Machine* (FSM) menggunakan ESP32 yang terbukti efektif 100% dalam mengelola parameter lingkungan secara deterministik tanpa konflik instruksi. Dengan akurasi sensor yang tinggi, sistem ini memberikan solusi kendali yang andal dan responsif untuk efisiensi budidaya selada di lahan terbatas. Untuk pengembangan selanjutnya, disarankan menambahkan *interface* berbasis aplikasi *mobile* untuk pemantauan jarak jauh, melakukan pengujian pada skala industri yang lebih kompleks, serta melakukan analisis mendalam terhadap korelasi antara presisi kendali sistem dengan kualitas serta produktivitas hasil panen secara fisik.

Referensi

- [1] F. Gultom and S. Harianto, "LUNTURNYA SEKTOR PERTANIAN DI PERKOTAAN," *J. Anal. Sosiol.*, pp. 49–72, 2022.
- [2] I. K. Sari *et al.*, "Teknik Budidaya Hidroponik dengan Sistem Rakit Apung di Desa Harapan Jaya, Pelalawan," *Nusant. Hasana J.*, vol. 2, no. 5, pp. 31–37, 2022, [Online]. Available: <https://nusantarahasanajournal.com/index.php/nhj/article/view/530>
- [3] J. Natalia, D. Tiljuir, M. Ardin, A. Gafur, and F. Rosalina, "Pengaruh Perbedaan Dosis Nutrisi AB Mix Sistem Hidroponik Rakit Apung Terhadap Pertumbuhan Tanaman Selada (*Lactuca Sativa L.*)," vol. 1, pp. 26–33, 2023.
- [4] A. F. Amalia, A. Dalapati, J. Firdaus, P. Haryono, and E. Rachmawatie, "PENGARUH KONSENTRASI AIR BAKU TERHADAP PERTUMBUHAN TANAMAN SELADA PADA BUDIDAYA HIDROPONIK Lokasi dan Waktu Penelitian," vol. 4, no. 2, pp. 1–6, 2021, doi: 10.13057/biodiv/d1601xx.
- [5] M. M. Munari, "Modeling and Optimization of the Design of a Robotic Hydroponic System," 2024.
- [6] Y. Cai *et al.*, "Smart Nutrient Solution Temperature Control System for Oversummering Lettuce Cultivation Based on Adaptive Dung Beetle Optimizer-Fuzzy PID," 2025.
- [7] F. Yunita, I. P. Pangaribuan, E. Willy, and A. Cahyadi, "Smart Coffee Maker Berbasis Internet of Things Smart Coffee Maker Based on Internet of Things," *Smart Coffee Mak. Berbas. Internet Things*, vol. 7, no. 3, pp. 1–8, 2020, [Online]. Available: <https://openlibrarypublications.telkomuniversity.ac.id/index.php/engineering/article/download/14203/13941>
- [8] U. T. Nurazura Alfahira, U. T. Dedi Triyanto, and U. T. Irma Nirmala, "SISTEM MONITORING DAN KENDALI TANAMAN HIDROPONIK INDOOR FARMING MENGGUNAKAN LED GROW LIGHT BERBASIS WEBSITE," *CodingKomputer dan Apl.*, vol. 09, no. 03, pp. 456–467, 2021.
- [9] A. R. Hutauruk, "KENDALI OTOMATIS TINGKAT KETINGGIAN AIR DAN MENGGUNAKAN METODE FINITE STATE MACHINE," vol. 13, no. 1, pp. 1703–1709, 2025.
- [10] K. Kumar, "Design of vending machine through implementation of visual automata simulator and finite state machine," vol. 2, no. 2, pp. 60–64, 2021.
- [11] K. M. Hasan, "Lexical Analysis Implementation by Using Deterministic Finite Automata (DFA)," 2021.
- [12] E. Korkan, S. O. Ramirez, and S. Steinhorst, "DyST : Dynamic Specification Mining for Heterogenous IoT Systems with WoT," pp. 147–162, 2024.
- [13] A. N. Wulandari, B. Syah, and S. Abadi, "Pengaruh Jenis Media Tanam Dan Pemberian Air Kelapa Muda Terhadap Pertumbuhan Dan Hasil Tanaman Bayam Merah (*Amaranthus Tricolor L*) Dengan Sistem Hidroponik Rakit Apung (Floating Raft)," vol. 10, no. 2, pp. 183–190, 2024.
- [14] I. A. Lestari, A. Rahayu, and Y. Mulyaningsih, "PERTUMBUHAN DAN PRODUKSI TANAMAN SELADA (*Lactuca sativaL.*) PADA BERBAGAI MEDIA TANAM DAN KONSENTRASI NUTRISI PADA SISTEM HIDROPONIK NUTRIENT FILM TECHNIQUE(NFT)," vol. 8, no. April, pp. 31–39, 2022.
- [15] I. Bezáková, K. Fluet, E. Hemaspaandra, H. Miller, and D. E. Narváez, "Effective Succinct Feedback for Intro CS Theory: A JFLAP Extension," pp. 976–982, 2022, doi: 10.1145/3478431.3499416.
- [16] K. (Universitas M. S. U. Umurani, Rahmatullah (Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara), M. (Universitas M. S. U. M, S. (Universitas M. S. U. Asfiati, and D. M. (Universitas M. S. U. Sandi, "FT-UMSU FT-UMSU," vol. 8, no. 1, pp. 97–106, 2025, [Online]. Available: <https://jurnal.umsu.ac.id/index.php/RMME/article/view/22371/12620>
- [17] M. E. Budiarta, "Pemodelan Sistem Pelacakan Posisi Sinar Matahari Berbasis Internet of Things (IoT) Berdasarkan Data Meteorologi," *Tek. Elektro*, vol. 11, pp. 227–235, 2022.
- [18] S. Ray, J. Das, R. Pande, and A. Nithya, "Swati Ray 1 , Joyati Das 2* , Ranjana Pande 3 , and A. Nithya 2," vol. 6, no. 5, pp. 195–222, 2025, doi: 10.1201/9781032622408-13.
- [19] R. Venantius, H. Ginardi, M. Husni, R. Wakhidatus, and S. Annisaa, "Integrasi Teknologi Internet of Things dalam Pengembangan Sistem Pemantauan Kualitas Air dan Kesehatan Udara Air Tawar untuk Optimalisasi Produk Perikanan," vol. 9, no. 1, 2025, [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.12962/j26139960.v9i1.2487>
- [20] R. A. Murdiyantoro, A. Izzinnahadi, and E. U. Armin, "Sistem Pemantauan Kondisi Air Hidroponik Berbasis Internet of Things Menggunakan NodeMCU ESP8266," *J. Telecommun. Electron. Control Eng.*, vol. 3, no. 2, pp. 54–61, 2021, doi: 10.20895/jtece.v3i2.258.
- [21] A. Rahmadani and A. Fernandes, "RANCANG BANGUN KWH METER PORTABEL DENGAN FITUR TAGIHAN SUSULAN DAN PEMUTUS OTOMATIS BERBASIS IOT," vol. 9, no. 3, pp. 3849–3856, 2025.
- [22] M. T. Hidayat, "Pengaruh Modifikasi Pompa dan Impeller Terhadap Unjuk Kerja Pompa Shimizu PS-128 BIT," *Pros. Ind. Res. Work. Natl. Semin.*, vol. 13, no. 01, pp. 740–747, 2022, doi: 10.35313/irwns.v13i01.4160.
- [23] N. (Politeknik N. B. Sugiarta, I. M. H. (Politeknik N. B. Riadi, I. B. G. (Politeknik N. B. Widiantara, I. M. (Politeknik N. B. Sugina, and I. M. D. G. A. T. (Politeknik N. B. Putra, "Uji Eksperimental Pendingin Termoelektrik Tenaga Surya Dengan," vol. 13, no. April, 2024, doi: 10.35724/mustek.v13i01.
- [24] A. M. Hendri, J. Jufrizel, H. Zarory, and A. Faizal, "Alat Monitoring Kadar Amonia dan Pengontrolan pH pada Kolam Ikan Lele Berbasis IoT," *Briliant J. Ris. dan Konseptual*, vol. 8, no. 1, p. 272, 2023, doi: 10.28926/briliant.v8i1.1200.
- [25] F. Ardiansyah, "PERANCANGAN MESIN CUP SEALER SEMI OTOMATIS BERBASIS MIKROKONTROLER," 2025.