

Rancang Bangun Sistem Kendali Kondisi Air Nutrisi Hidroponik Menggunakan Metode Forward Chaining

Cani, Irma Nirmala, Suhardi

Program Studi Rekayasa Sistem Komputer, Fakultas MIPA, Universitas Tanjungpura, Pontianak

sanicani224@student.untan.ac.id; irma.nirmala@siskom.untan.ac.id; suhardi@siskom.untan.ac.id

Abstrak

Pertanian hidroponik membutuhkan pemantauan dan pengendalian kondisi air nutrisi secara konsisten agar tanaman dapat tumbuh dengan optimal. Penelitian ini merancang dan mengimplementasikan sistem kendali otomatis kondisi air nutrisi pada instalasi hidroponik menggunakan metode forward chaining berbasis sistem pakar. Sistem memantau tiga parameter kondisi air secara serentak: kadar nutrisi (Total Dissolved Solids/TDS dalam satuan ppm), tingkat keasaman (pH), dan suhu air. Pengendalian dilakukan melalui tujuh aktuator yang diaktifkan berdasarkan 27 aturan forward chaining yang disusun melalui konsultasi dengan dua pakar hidroponik dan satu pakar pertanian. Arsitektur sistem menggunakan dua mikrokontroler dengan tugas terpisah: Arduino Uno menangani pembacaan sensor secara analog, sementara NodeMCU ESP32 menjalankan mesin inferensi forward chaining dan mengendalikan aktuator. Kontribusi utama penelitian ini adalah integrasi regulasi suhu aktif menggunakan modul peltier dan pemanas yang dikendalikan sepenuhnya oleh basis pengetahuan forward chaining—aspek yang belum ditangani pada sistem kendali hidroponik berbasis forward chaining sebelumnya. Pengujian akurasi sensor menghasilkan rata-rata 99,47% untuk sensor TDS, 96,85% untuk sensor pH, dan 97,35% untuk sensor suhu DS18B20. Validasi metode forward chaining terhadap seluruh 27 rule menghasilkan akurasi 100%.

Kata Kunci : Hidroponik, Forward Chaining, Sistem Pakar, TDS, pH, ESP32

1. PENDAHULUAN

Ketersediaan lahan pertanian di kawasan perkotaan terus menyusut akibat alih fungsi lahan untuk keperluan industri dan perumahan. Kondisi ini mendorong berkembangnya urban agriculture berbasis sistem vertikal dan hidroponik sebagai solusi keterbatasan ruang sekaligus respons terhadap krisis ketahanan pangan di kota-kota besar (Găgeanu et al., 2024). Hidroponik memungkinkan budidaya tanaman tanpa tanah, memanfaatkan air sebagai media pembawa nutrisi, dan dapat dijalankan di lahan sempit maupun dalam ruangan (Herwibowo & Budiana, 2014).

Keberhasilan budidaya hidroponik sangat bergantung pada kualitas kondisi air nutrisi. Tiga parameter kritis yang menentukan kualitas tersebut adalah: (1) kadar Total Dissolved Solids (TDS) dalam satuan ppm yang mencerminkan konsentrasi nutrisi terlarut, (2) tingkat keasaman (pH) yang memengaruhi kemampuan tanaman menyerap unsur hara (Hadiatna et al., 2020), dan (3) suhu air yang berpengaruh langsung pada laju metabolisme akar, aktivitas enzim, dan ketersediaan oksigen terlarut dalam larutan nutrisi (Ilahi et al., 2024). Pemantauan ketiga parameter ini secara serentak merupakan kebutuhan mendasar sistem kendali hidroponik yang efektif (Ardiansyah et al., 2023).

Sebagian besar petani hidroponik skala kecil masih mengandalkan pengukuran kondisi air secara manual menggunakan alat ukur konvensional. Metode ini memerlukan tenaga dan waktu yang signifikan, rentan terhadap kesalahan manusia, dan tidak mampu memberikan respons cepat ketika kondisi air menyimpang dari rentang optimal

(Andrianto & Suryaningsih, 2023; Simanjuntak et al., 2020). Penerapan sistem otomatis berbasis sistem pakar menjadi solusi yang tepat karena mampu meniru penalaran pakar dalam mengambil keputusan secara real-time berdasarkan data sensor (Azmi & Yasin, 2017).

Beberapa penelitian telah mengeksplorasi otomasi sistem hidroponik. (Nugraha et al., 2017) mengembangkan sistem otomatisasi kendali nutrisi menggunakan metode forward chaining dengan sensor TDS, pH, dan suhu air, namun tanpa pengendalian suhu aktif melalui aktuator pemanas atau pendingin. (Adidrana et al., 2022) membangun sistem kendali nutrisi hidroponik berbasis IoT yang mampu mengendalikan beberapa parameter secara simultan, namun tidak menggunakan basis pengetahuan sistem pakar dalam pengambilan keputusannya. (Putra et al., 2018) membangun sistem pemantauan nutrisi, suhu, dan ketinggian air dengan aktuator heater dan peltier berbasis website, tetapi tanpa metode sistem pakar berbasis aturan. Penelitian tentang kendali suhu air nutrisi secara khusus telah dilakukan menggunakan metode PID Controller (Firdausyah et al., 2022) dan Fuzzy Logic Controller (Asmbangnirwana et al., 2022), namun keduanya tidak mengintegrasikan pengendalian suhu dalam satu basis pengetahuan bersama parameter TDS dan pH. (Situmorang et al., 2020) mengembangkan sistem kendali hidroponik berbasis Android menggunakan forward chaining dengan parameter nutrisi, pH, kelembaban udara, dan intensitas cahaya melalui LoRa. Meskipun berhasil mengendalikan empat parameter lingkungan, sistem tersebut tidak mencakup pengukuran suhu air nutrisi maupun pengendalian suhu aktif. Suhu air yang melebihi rentang optimal secara langsung menurunkan

ketersediaan oksigen terlarut dan memperlambat penyerapan nutrisi oleh akar tanaman (Ilahi et al., 2024).

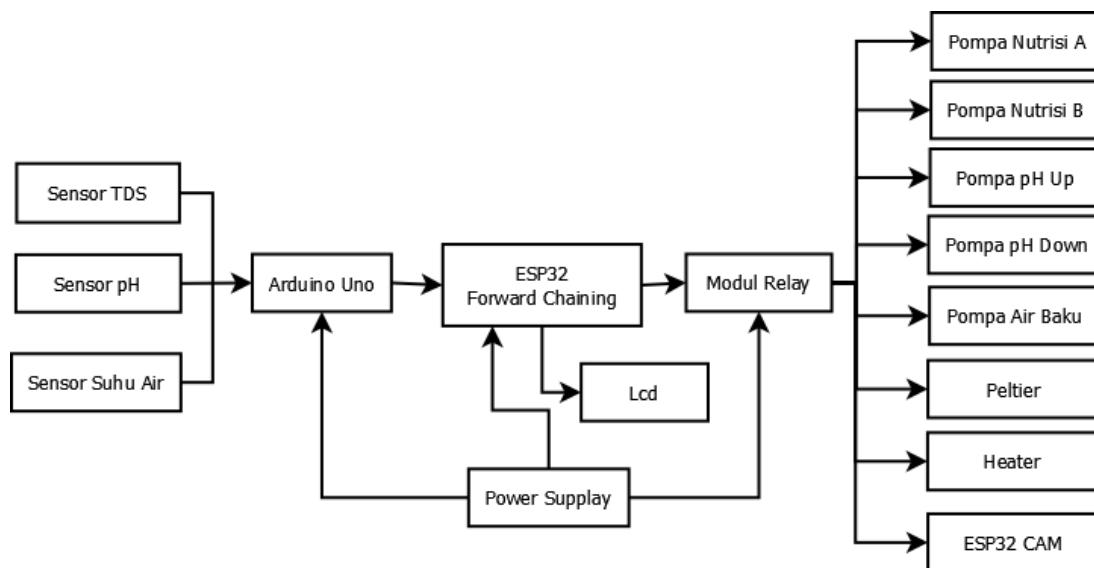
Berdasarkan tinjauan tersebut, terdapat celah penelitian pada sistem yang mengintegrasikan: (1) pemantauan tiga parameter kondisi air nutrisi secara serentak, TDS, pH, dan suhu air, (2) pengendalian suhu aktif melalui modul peltier dan pemanas yang dikendalikan oleh satu basis pengetahuan forward chaining bersama TDS dan pH, (3) arsitektur dual mikrokontroler yang memisahkan fungsi akuisisi sensor dari fungsi inferensi untuk meningkatkan stabilitas sistem, dan (4) basis pengetahuan 27 aturan yang diturunkan dari konsultasi langsung dengan pakar hidroponik dan pertanian. Penelitian ini

bertujuan merancang dan mengimplementasikan sistem yang menjawab keempat celah tersebut.

2. METODE PENELITIAN

2.1 Deskripsi dan Arsitektur Sistem

Sistem yang dirancang bertujuan untuk mengendalikan kondisi air nutrisi pada instalasi hidroponik secara otomatis berdasarkan penalaran sistem pakar. Sistem membaca tiga parameter air secara berkelanjutan dan mengaktifkan aktuatur yang sesuai untuk mempertahankan parameter tersebut dalam rentang optimal bagi pertumbuhan tanaman. Gambar 1 menunjukkan arsitektur sistem secara keseluruhan.



Gambar 1. Arsitektur sistem kendali kondisi air nutrisi hidroponik

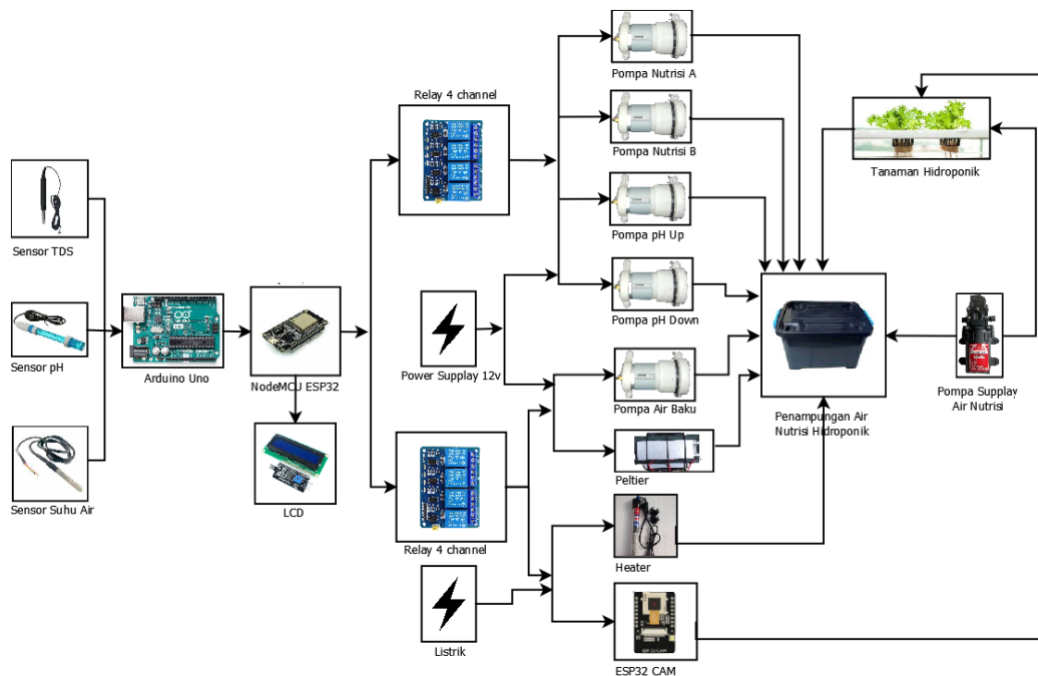
Arsitektur sistem terdiri dari dua subsistem utama yang dihubungkan melalui komunikasi serial UART. Subsistem pertama adalah unit akuisisi data berbasis Arduino Uno yang membaca nilai sensor TDS, pH (PH-4502C), dan suhu air (DS18B20) secara analog/digital dan mengirimkan hasilnya ke subsistem kedua. Subsistem kedua adalah unit pengambilan keputusan berbasis NodeMCU ESP32 yang menjalankan mesin inferensi forward chaining dan mengendalikan tujuh aktuatur melalui modul relay. Pemisahan fungsi ini dilakukan karena sensor pH dan TDS menghasilkan sinyal analog sensitif yang memerlukan ADC berdedikasi pada Arduino Uno, sementara logika forward chaining dengan 27 aturan membutuhkan sumber daya komputasi yang lebih besar yang disediakan oleh ESP32 dual-core 240 MHz.

Sistem menggunakan dua mikrokontroler utama: Arduino Uno (ATmega328P) sebagai unit akuisisi data yang membaca sensor TDS (0–1000 ppm), sensor pH PH-4502C (rentang 0–14), dan sensor suhu DS18B20 (protokol 1-Wire, –55 s.d. 125°C); serta NodeMCU ESP32 (dual-core 240

MHz) sebagai unit kendali yang menjalankan mesin inferensi forward chaining dan mengendalikan tujuh aktuatur—pompa nutrisi AB Mix, pompa pH Up, pompa pH Down, pompa air baku, modul peltier (pendingin termoelektrik TEC1), pemanas (heater salam), dan satu pompa sirkulasi—melalui modul relay. LCD 16×2 terhubung ke ESP32 untuk menampilkan nilai sensor secara lokal.

2.2 Desain Perangkat Keras

Perancangan perangkat keras dilakukan dengan menghubungkan sensor TDS, sensor pH-4502C, dan sensor suhu DS18B20 ke Arduino Uno. Sensor DS18B20 menggunakan protokol komunikasi 1-Wire yang terhubung langsung ke pin digital Arduino. Arduino Uno kemudian dihubungkan ke NodeMCU ESP32 melalui antarmuka serial UART. ESP32 mengendalikan tujuh aktuatur (pompa nutrisi AB Mix, pompa pH Up, pompa pH Down, pompa air baku, peltier, heater, dan satu pompa sirkulasi) melalui dua modul relay 4-channel. Gambar 2 memperlihatkan skema perancangan perangkat keras secara lengkap.

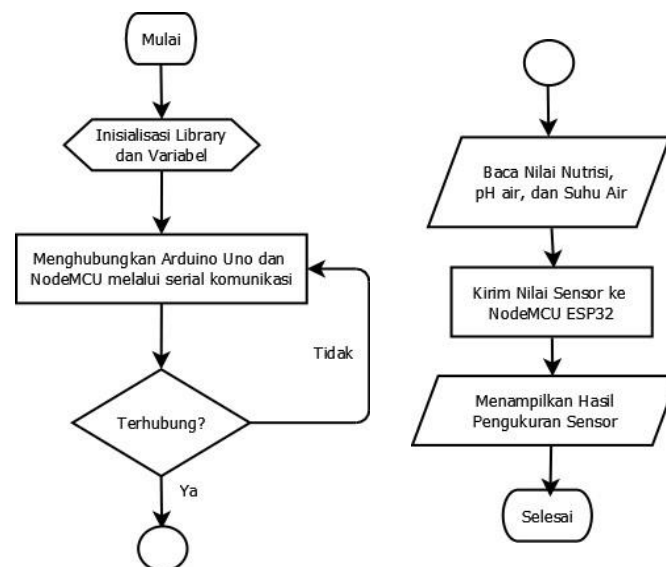


Gambar 2. Perancangan perangkat keras sistem kendali kondisi air nutrisi

2.3 Desain Perangkat Lunak

Perangkat lunak terdiri dari dua program terpisah yang dijalankan pada masing-masing mikrokontroler. Program pada Arduino Uno menangani: inisialisasi library sensor, pembacaan

nilai analog sensor TDS dan pH, pembacaan digital sensor DS18B20, serta pengiriman data melalui port serial ke NodeMCU ESP32 dalam format string terstruktur. Gambar 3 menunjukkan diagram alur kerja Arduino Uno dan pembacaan sensor.



Gambar 3. Diagram alur Arduino Uno (akuisisi sensor)

Program pada NodeMCU ESP32 menangani: penerimaan data serial dari Arduino Uno, parsing nilai TDS, pH, dan suhu, klasifikasi nilai ke dalam kode parameter (P1–P9), eksekusi mesin inferensi forward chaining, serta pengendalian relay aktuatur.

2.4 Metode Forward Chaining

Forward chaining adalah metode penalaran maju (data-driven) yang dimulai dari fakta-fakta yang diketahui kemudian mencocokkannya dengan bagian kondisi (IF) dari aturan IF-THEN dalam basis

pengetahuan. Jika kondisi terpenuhi, aturan tersebut diaktifkan dan bagian THEN-nya dieksekusi untuk menghasilkan fakta atau aksi baru (Arie & Salman, 2019; Azmi & Yasin, 2017). Proses ini berulang hingga tidak ada lagi aturan yang dapat diaktifkan. Pada sistem ini, fakta berupa nilai pembacaan sensor TDS, pH, dan suhu yang dikategorikan ke dalam kode parameter, kemudian dicocokkan dengan 27 aturan basis pengetahuan untuk menentukan kondisi air dan aktuatur yang harus diaktifkan.

2.4.1 Parameter Pengukuran Air Nutrisi

Nilai ambang batas parameter air nutrisi ditetapkan berdasarkan hasil wawancara dengan dua orang pakar hidroponik dan satu pakar pertanian dari Kalimantan Barat. Tabel 2 memuat sembilan kode parameter yang digunakan sebagai fakta input sistem pakar.

Tabel 1. Nilai parameter pengukuran air nutrisi hidroponik

Kode	Kondisi Pengukuran	Rentang Nilai
P1	TDS normal	$560 \leq \text{ppm} \leq 840$
P2	TDS di atas batas	$\text{ppm} > 840$
P3	TDS di bawah batas	$\text{ppm} < 560$
P4	pH normal	$6,0 \leq \text{pH} \leq 7,0$
P5	pH di atas batas	$\text{pH} > 7,0$
P6	pH di bawah batas	$\text{pH} < 6,0$
P7	Suhu normal	$22^\circ\text{C} \leq \text{suhu} \leq 27^\circ\text{C}$
P8	Suhu di atas batas	$\text{suhu} > 27^\circ\text{C}$
P9	Suhu di bawah batas	$\text{suhu} < 22^\circ\text{C}$

2.4.2 Daftar Kondisi Air Nutrisi

Kombinasi dari ketiga parameter menghasilkan 27 kondisi air nutrisi (K1–K27) yang merepresentasikan seluruh kemungkinan status TDS, pH, dan suhu secara bersamaan. Tabel 3 menampilkan seluruh daftar kondisi yang menjadi target identifikasi sistem pakar.

Tabel 2. Daftar kondisi air nutrisi hidroponik

Kode	Kombinasi Kondisi Air	Kode	Kombinasi Kondisi Air
K1	TDS normal, pH normal, Suhu normal	K15	TDS kurang, pH rendah, Suhu normal
K2	TDS lebih, pH normal, Suhu normal	K16	TDS normal, pH tinggi, Suhu tinggi
K3	TDS kurang, pH normal, Suhu normal	K17	TDS normal, pH tinggi, Suhu rendah
K4	TDS normal, pH tinggi, Suhu normal	K18	TDS normal, pH rendah, Suhu tinggi
K5	TDS normal, pH rendah, Suhu normal	K19	TDS normal, pH rendah, Suhu rendah
K6	TDS normal, pH normal, Suhu tinggi	K20	TDS lebih, pH tinggi, Suhu tinggi
K7	TDS normal, pH normal, Suhu rendah	K21	TDS lebih, pH tinggi, Suhu rendah
K8	TDS lebih, pH normal, Suhu tinggi	K22	TDS kurang, pH tinggi, Suhu tinggi
K9	TDS lebih, pH normal, Suhu rendah	K23	TDS kurang, pH tinggi, Suhu rendah

K10	TDS kurang, pH normal, Suhu tinggi	K24	TDS lebih, pH rendah, Suhu tinggi
K11	TDS kurang, pH normal, Suhu rendah	K25	TDS lebih, pH rendah, Suhu rendah
K12	TDS lebih, pH tinggi, Suhu normal	K26	TDS kurang, pH rendah, Suhu tinggi
K13	TDS kurang, pH tinggi, Suhu normal	K27	TDS kurang, pH rendah, Suhu rendah
K14	TDS lebih, pH rendah, Suhu normal		

2.4.3 Basis Pengetahuan dan Aturan Forward Chaining

Basis pengetahuan terdiri dari 27 aturan (R1–R27) dalam format IF [kondisi air] THEN [aktifkan aktuator]. Setiap aturan menghubungkan satu kondisi K dengan satu atau lebih aktuator yang harus diaktifkan. Tabel 4 menyajikan seluruh aturan beserta respons aktuator yang bersesuaian.

Tabel 3. Basis pengetahuan: aturan forward chaining dan respons aktuator

Rule	Kode	Kondisi Air (IF)	Respons Aktuator (THEN)
R1	K1	TDS normal, pH normal, Suhu normal	Tidak ada aktuator aktif
R2	K2	TDS lebih, pH normal, Suhu normal	Pompa air baku aktif
R3	K3	TDS kurang, pH normal, Suhu normal	Pompa nutrisi AB Mix aktif
R4	K4	TDS normal, pH tinggi, Suhu normal	Pompa pH Down aktif
R5	K5	TDS normal, pH rendah, Suhu normal	Pompa pH Up aktif
R6	K6	TDS normal, pH normal, Suhu tinggi	Peltier (pendingin) aktif
R7	K7	TDS normal, pH normal, Suhu rendah	Heater (pemanas) aktif
R8	K8	TDS lebih, pH normal, Suhu tinggi	Pompa air baku + Peltier
R9	K9	TDS lebih, pH normal, Suhu rendah	Pompa air baku + Heater
R10	K10	TDS kurang, pH normal, Suhu tinggi	Pompa AB Mix + Peltier
R11	K11	TDS kurang, pH normal, Suhu rendah	Pompa AB Mix + Heater
R12	K12	TDS lebih, pH	Pompa air baku +

		tinggi, Suhu normal	Pompa pH Down
R13	K13	TDS kurang, pH tinggi, Suhu normal	Pompa AB Mix + Pompa pH Down
R14	K14	TDS lebih, pH rendah, Suhu normal	Pompa air baku + Pompa pH Up
R15	K15	TDS kurang, pH rendah, Suhu normal	Pompa AB Mix + Pompa pH Up
R16	K16	TDS normal, pH tinggi, Suhu tinggi	Pompa pH Down + Peltier
R17	K17	TDS normal, pH tinggi, Suhu rendah	Pompa pH Down + Heater
R18	K18	TDS normal, pH rendah, Suhu tinggi	Pompa pH Up + Peltier
R19	K19	TDS normal, pH rendah, Suhu rendah	Pompa pH Up + Heater
R20	K20	TDS lebih, pH tinggi, Suhu tinggi	Pompa air baku + pH Down + Peltier
R21	K21	TDS lebih, pH tinggi, Suhu rendah	Pompa air baku + pH Down + Heater
R22	K22	TDS kurang, pH tinggi, Suhu tinggi	Pompa AB Mix + pH Down + Peltier
R23	K23	TDS kurang, pH tinggi, Suhu rendah	Pompa AB Mix + pH Down + Heater

R24	K24	TDS lebih, pH rendah, Suhu tinggi	Pompa air baku + pH Up + Peltier
R25	K25	TDS lebih, pH rendah, Suhu rendah	Pompa air baku + pH Up + Heater
R26	K26	TDS kurang, pH rendah, Suhu tinggi	Pompa AB Mix + pH Up + Peltier
R27	K27	TDS kurang, pH rendah, Suhu rendah	Pompa AB Mix + pH Up + Heater

Algoritma forward chaining bekerja dalam siklus berikut: (1) ESP32 menerima nilai TDS, pH, dan suhu dari Arduino melalui serial; (2) nilai dikategorikan ke kode parameter P1–P9; (3) kombinasi kode parameter dicocokkan dengan bagian IF dari aturan R1–R27; (4) setiap aturan yang kondisinya terpenuhi diaktifkan dan aktuatur pada bagian THEN dinyalakan melalui relay. Beberapa aturan dapat aktif bersamaan apabila lebih dari satu parameter menyimpang secara simultan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Implementasi Sistem

Implementasi sistem mencakup perakitan seluruh komponen perangkat keras dan pemrograman kedua mikrokontroler. Gambar 4 menampilkan hasil implementasi keseluruhan sistem pada instalasi hidroponik.



Gambar 4. Implementasi keseluruhan sistem pada instalasi hidroponik

Sensor TDS, sensor pH-4502C, dan sensor suhu DS18B20 terhubung ke Arduino Uno. NodeMCU ESP32 dihubungkan ke dua modul relay 4-channel yang mengendalikan pompa nutrisi AB Mix, pompa pH Up, pompa pH Down, pompa air baku, modul peltier, dan heater. Komunikasi data antara Arduino Uno dan ESP32 dilakukan melalui serial UART dengan baud rate 9600 bps. LCD 16×2 yang terhubung ke ESP32 menampilkan nilai sensor

secara lokal untuk keperluan monitoring dan pemeliharaan.

3.2 Pengujian Akurasi Sensor

Pengujian akurasi dilakukan dengan membandingkan hasil pembacaan sensor sistem terhadap alat ukur referensi sebanyak 30 kali pengukuran per sensor. Akurasi dihitung menggunakan persamaan:

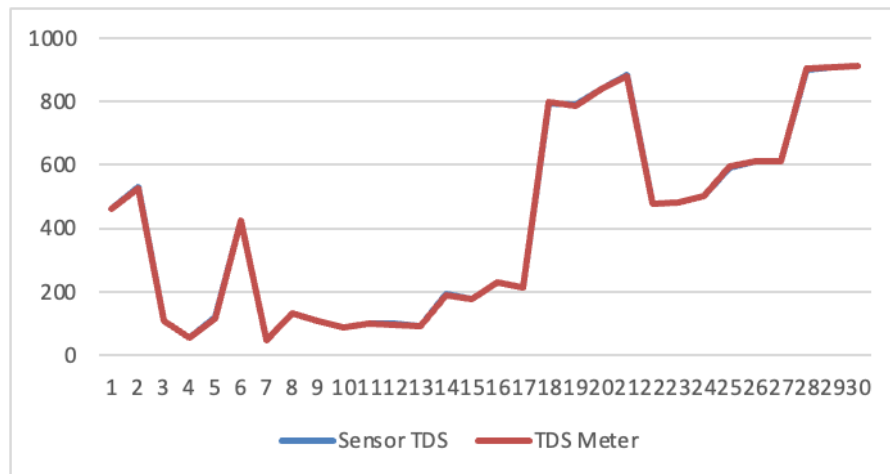
$$\text{Akurasi (\%)} = 100\% - \text{Error rata-rata (\%)}$$

Error rata-rata (%) = $(\Sigma|\text{Nilai sensor} - \text{Nilai referensi}| / \text{Nilai referensi}) / n \times 100\%$

3.2.1 Pengujian Sensor TDS

Pengujian sensor TDS menggunakan 30 sampel larutan nutrisi AB Mix dengan variasi konsentrasi yang mencakup kondisi TDS di bawah batas (<560 ppm), normal (560–840 ppm), dan di atas batas

(>840 ppm). Nilai sensor dibandingkan dengan TDS meter sebagai referensi. Gambar 6 menampilkan perbandingan hasil pembacaan sensor TDS dengan TDS meter untuk seluruh 30 data pengujian. Hasil pengujian menunjukkan error rata-rata 0,53% sehingga diperoleh akurasi rata-rata sensor TDS sebesar 99,47%.

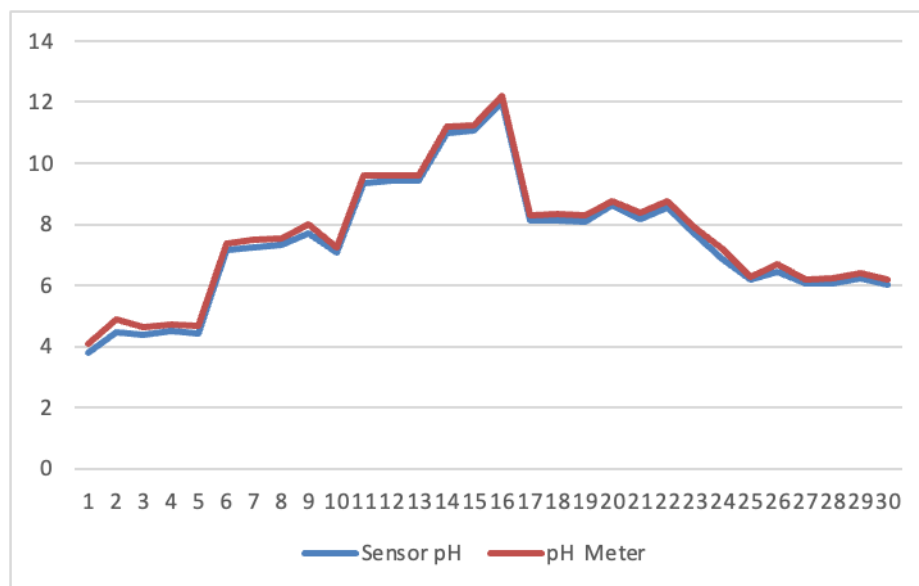


Gambar 6. Perbandingan pembacaan sensor TDS dengan TDS meter

3.2.2 Pengujian Sensor pH

Pengujian sensor pH-4502C menggunakan 30 sampel air dengan penambahan larutan pH Up dan pH Down pada variasi konsentrasi yang mencakup kondisi pH rendah (<6,0), normal (6,0–7,0), dan

tinggi (>7,0). Nilai sensor dibandingkan terhadap pH meter referensi. Gambar 7 menampilkan perbandingan hasil pembacaan sensor pH dengan pH meter untuk seluruh 30 data pengujian. Selisih rata-rata yang diperoleh adalah 0,22 unit pH, dengan error rata-rata 3,15% dan akurasi rata-rata sebesar 96,85%.

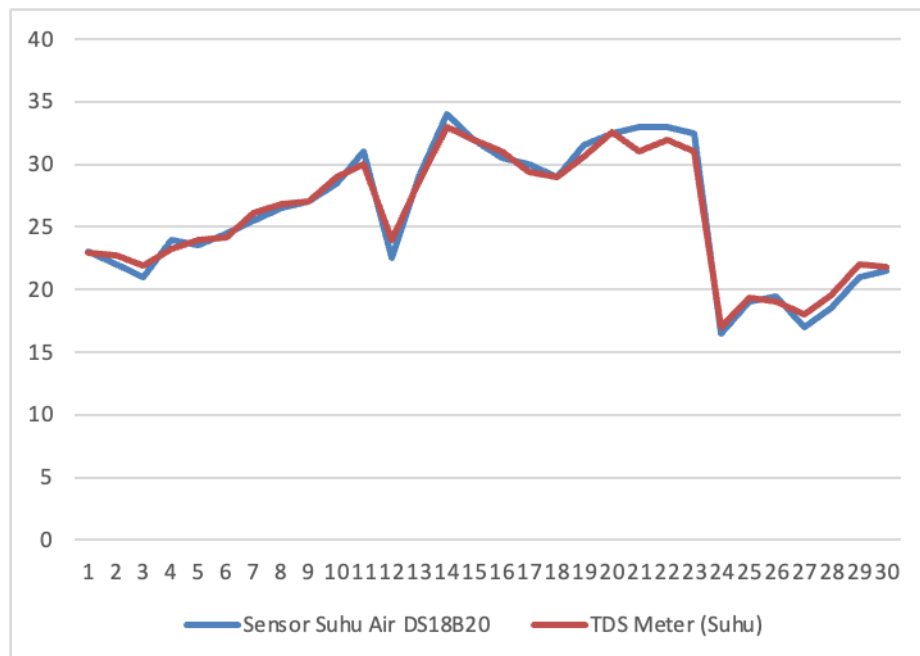


Gambar 7. Perbandingan pembacaan sensor pH dengan pH meter

3.2.3 Pengujian Sensor Suhu DS18B20

Pengujian sensor suhu DS18B20 dilakukan 30 kali pada rentang suhu 16–33°C yang mencakup kondisi suhu rendah (<22°C), normal (22–27°C), dan tinggi (>27°C). Nilai sensor dibandingkan terhadap pembacaan suhu pada TDS meter referensi yang

dilengkapi sensor suhu terintegrasi. Gambar 8 menampilkan perbandingan hasil pembacaan sensor DS18B20 dengan TDS meter untuk seluruh 30 data pengujian. Selisih rata-rata yang diperoleh adalah 0,67°C, dengan error rata-rata 2,65% dan akurasi rata-rata sebesar 97,35%.



Gambar 8. Perbandingan pembacaan sensor suhu DS18B20 dengan TDS meter

Tabel 4. Rangkuman hasil pengujian akurasi sensor

Sensor	Alat Referensi	Selisih Rata-rata	Error Rata-rata (%)	Akurasi (%)
TDS	TDS meter	0,53 ppm ekuivalen	0,53	99,47
pH	pH meter	0,22 unit pH	3,15	96,85
Suhu	TDS meter	0,67°C	2,65	97,35

3.3 Pengujian Metode Forward Chaining

Pengujian validasi metode forward chaining dilakukan dengan menguji seluruh 27 rule secara individual. Untuk setiap rule, disiapkan sampel air uji dengan nilai TDS, pH, dan suhu yang sesuai dengan kondisi rule tersebut, kemudian diamati apakah kondisi yang teridentifikasi dan aktuator yang diaktifkan sesuai dengan aturan yang telah ditentukan. Tabel 6 menyajikan sebagian representatif dari hasil pengujian.

Tabel 5. Hasil pengujian metode forward chaining (sampel representatif)

Rule	TDS (ppm)	pH	Suhu (°C)	Kondisi	Aktuator Aktif	Keterangan
R1	733	6,87	26,5	K1	Tidak ada	Valid
R2	877	6,75	27,0	K2	Pompa air baku	Valid
R3	249	6,86	26,5	K3	Pompa AB Mix	Valid
R4	806	8,15	23,0	K4	Pompa pH Down	Valid
R5	619	5,21	26,0	K5	Pompa pH Up	Valid
R6	720	6,50	29,8	K6	Peltier aktif	Valid
R7	700	6,80	20,5	K7	Heater aktif	Valid
R15	460	5,74	25,0	K15	AB Mix + pH Up	Valid
R20	926	8,44	30,0	K20	Air baku + pH Down + Peltier	Valid
R23	485	8,44	17,5	K23	AB Mix + pH Down + Heater	Valid
R27	460	5,00	18,0	K27	AB Mix + pH Up + Heater	Valid
...	...	...	...	...	...	...

Pengujian terhadap seluruh 27 rule menunjukkan bahwa mesin inferensi forward chaining berhasil mengidentifikasi kondisi air secara tepat dan mengaktifkan aktuator yang sesuai pada setiap kasus uji. Akurasi metode forward chaining yang diperoleh adalah 100% dari 27 data uji yang dilakukan.

3.4 Pembahasan

Sistem yang dikembangkan berhasil membuktikan bahwa arsitektur dual mikrokontroler dengan pemisahan fungsi antara Arduino Uno dan ESP32 mampu menjalankan sistem kendali kondisi air nutrisi hidroponik yang stabil dan akurat. Pemisahan fungsi ini terbukti efektif: ADC 10-bit

Arduino Uno menangani pembacaan sinyal analog sensor pH dan TDS yang sensitif tanpa gangguan dari proses komputasi, sementara ESP32 memproses logika forward chaining dengan 27 aturan tanpa beban pembacaan sensor analog.

Dibandingkan dengan sistem (Situmorang et al., 2020) yang menggunakan metode forward chaining dengan parameter kelembaban udara dan intensitas cahaya melalui platform Android berbasis LoRa, sistem yang dikembangkan pada penelitian ini secara spesifik mengendalikan parameter kondisi air nutrisi, TDS, pH, dan suhu air, yang merupakan faktor langsung penentu ketersediaan dan penyerapan nutrisi oleh akar tanaman. Perbedaan mendasar terletak pada penambahan regulasi suhu aktif menggunakan modul peltier (pendingin) dan heater (pemanas) yang dikendalikan sepenuhnya oleh mesin inferensi forward chaining. Penelitian (Ilahi et al., 2024) mengkonfirmasi bahwa variasi suhu larutan nutrisi pada sistem NFT secara signifikan mempengaruhi pertumbuhan tanaman, dan bahwa sistem pendinginan aktif diperlukan untuk menjaga suhu dalam rentang optimal—terutama pada kondisi tropis dengan suhu ambien yang tinggi. Dengan mengintegrasikan pengendalian suhu aktif ke dalam basis pengetahuan forward chaining bersama parameter TDS dan pH, sistem ini memberikan respons yang lebih komprehensif dibandingkan pendekatan kendali suhu terpisah yang umum digunakan sebelumnya (Asmbangnirwana et al., 2022; Firdausyah et al., 2022).

Nilai akurasi sensor yang tinggi (TDS 99,47%, pH 96,85%, DS18B20 97,35%) mengkonfirmasi keandalan komponen sensor yang dipilih untuk aplikasi hidroponik. Akurasi sensor pH sebesar 96,85% dengan selisih rata-rata 0,22 unit masih berada dalam toleransi yang dapat diterima mengingat rentang kontrol pH yang digunakan adalah 1 unit (6,0–7,0), sehingga deviasi 0,22 unit tidak akan menyebabkan pengambilan keputusan yang keliru pada sistem. Akurasi 100% pada validasi forward chaining mengkonfirmasi bahwa 27 aturan yang dikembangkan dari konsultasi pakar telah dikodekan dengan benar dan mampu menangkap seluruh kombinasi kondisi yang mungkin terjadi secara simultan pada ketiga parameter.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil merancang dan mengimplementasikan sistem kendali kondisi air nutrisi hidroponik menggunakan metode forward chaining pada arsitektur dual mikrokontroler Arduino Uno–NodeMCU ESP32. Kesimpulan yang dapat diambil adalah sebagai berikut.

1. Arsitektur dual mikrokontroler yang memisahkan fungsi akuisisi sensor analog (Arduino Uno) dari fungsi inferensi dan kendali aktuatur (NodeMCU ESP32) terbukti efektif menghasilkan sistem kendali yang stabil, modular, dan mudah dikembangkan.
2. Integrasi regulasi suhu aktif menggunakan modul peltier dan pemanas yang dikendalikan oleh mesin inferensi forward chaining merupakan kontribusi

utama yang membedakan sistem ini dari penelitian forward chaining hidroponik sebelumnya yang tidak mencakup pengendalian suhu air nutrisi.

3. Basis pengetahuan yang terdiri dari 27 aturan forward chaining dikembangkan melalui konsultasi dengan pakar dan divalidasi dengan akurasi 100% terhadap seluruh 27 kasus uji, membuktikan ketepatan kodifikasi pengetahuan pakar ke dalam sistem.

4. Pengujian akurasi sensor menghasilkan TDS 99,47%, pH 96,85%, dan DS18B20 97,35%, yang menunjukkan keandalan komponen sensor yang dipilih dan kesiapan sistem untuk dioperasikan pada instalasi hidroponik nyata.

Sebagai saran pengembangan, sistem dapat diperluas dengan penambahan konektivitas IoT untuk pemantauan dan kendali jarak jauh, penambahan parameter sensor seperti ketinggian air dan electrical conductivity (EC), serta pengembangan basis pengetahuan adaptif berbasis data historis pertumbuhan tanaman.

DAFTAR PUSTAKA

- Adidrana, D., Iskandar, A. R., Nurhayati, A., Suyatno, Ramdhani, M., Adam, K. B., Ardianto, R., & Ekaputri, C. (2022). Simultaneous Hydroponic Nutrient Control Automation System Based on Internet of Things. *Joiv International Journal on Informatics Visualization*, 6(1), 124. <https://doi.org/10.30630/joiv.6.1.865>
- Andrianto, H., & Suryaningsih, S. (2023). Pemantauan dan Pengendalian Nutrisi pada Tanaman Hidroponik Sistem Wick Berbasis IoT. *Elkomika: Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, & Teknik Elektronika*, 11(4), 968–981. <https://doi.org/10.26760/elkomika.v11i4.968>
- Ardiansyah, M. A., Wirawan, I. G., & Agustianto, K. (2023). Penerapan Metode Fuzzy Logic pada Penentuan Kualitas Nutrisi Air dari Tanaman Hidroponik. *InComTech: Jurnal Telekomunikasi Dan Komputer*, 13(3). <https://doi.org/10.22441/incomtech.v13i3.18035>
- Arie, & Salman, M. (2019). Penerapan Metode Forward Chaining untuk Sistem Pakar Diagnosis Penyakit pada Mata. *JATI: Jurnal Mahasiswa Teknik Informatika*, 3(1), 380–386.
- Asmbangnirwana, I., Endryansyah, Rusimamto, P. W., & Zuhrie, M. S. (2022). Pengendalian Suhu Air Nutrisi Pada Hidroponik NFT (Nutrient Film Technique) Berbasis Fuzzy Logic Controller. *Jurnal Teknik Elektro*, 11(1), 108–116. <https://doi.org/10.26740/jte.v11n1.p108-116>
- Azmi, Z., & Yasin, V. (2017). *Pengantar Sistem Pakar dan Metode (Introduction of Expert System and Methods)*. Mitra Wacana Media.
- Firdausyah, M. J. D., Rusimamto, P. W., Suprianto, B., & Endryansyah. (2022). Sistem Pengendali Suhu Air Nutrisi Pada Hidroponik NFT

- (Nutrient Film Technique) Berbasis PID Controller. *Jurnal Teknik Elektro*, 11(1), 117–125. <https://doi.org/10.26740/jte.v11n1.p117-125>
- Găgeanu, I., Tăbărașu, A.-M., Persu, C., Gheorghe, G., Nițu, M., Cujbescu, D., IONESCU, A., & ANGHELACHE, D. (2024). Hydroponic Vertical Systems: Enhancing Climate Resilience, Water Efficiency, and Urban Agriculture. *Inmateh Agricultural Engineering*, 94–109. <https://doi.org/10.35633/inmateh-73-08>
- Hadiatna, F., Dzulfahmi, A., & Nataliana, D. (2020). Analisis Penerapan Kendali Otomatis Berbasis PID terhadap pH Larutan. *Elkomika: Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, & Teknik Elektronika*, 8(1), 163–177. <https://doi.org/10.26760/elkomika.v8i1.163>
- Herwibowo, K., & Budiana, N. S. (2014). *Hidroponik Sayuran untuk Hobi dan Bisnis*. Penebar Swadaya.
- Ilahi, W. F. F., Rosdi, N. S. I., & Tajri, A. A. (2024). Evaluating temperature variation of nutrient solution in nutrient film technique (NFT) cooling system for temperate vegetable. *Journal of Tropical Resources and Sustainable Science*, 12(1), 47–50. <https://doi.org/10.47253/jtrss.v12i1.1364>
- Nugraha, Y. E., Irawan, B., & Saputra, R. E. (2017). Pengembangan Sistem Otomatisasi Pengendalian Nutrisi pada Hidroponik Menggunakan Sistem Pakar dengan Metode Forward Chaining. *E-Proceeding of Engineering*, 4(2), 2199–2206.
- Putra, Y. H., Triyanto, D., & Suhardi. (2018). Sistem Pemantauan dan Pengendalian Nutrisi, Suhu, dan Tinggi Air pada Pertanian Hidroponik Berbasis Website. *Jurnal Coding, Sistem Komputer Untan*, 6(3), 128–138.
- Simanjuntak, M. N., Andromeda, T., & Soetrisno, Y. A. A. (2020). Perancangan Sistem Monitoring dan Kendali Derajat Keasaman pada Tanaman Hidroponik Sistem NFT Menggunakan Metode Kontrol PID. *Transient: Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*, 9(4), 556–563. <https://doi.org/10.14710/transient.v9i4.556-563>
- Situmorang, C., Irawan, B., & Setianingsih, C. (2020). Sistem Kendali Terpusat Kebutuhan Tanaman Hidroponik Menggunakan Metode Forward Chaining Berbasis Android. *E-Proceeding of Engineering*, 7(2), 4943–4950.