

Evaluasi Kinerja Sistem Monitoring TDS dan Sirkulasi Larutan Nutrisi Berbasis IoT pada Hidroponik Tower Bertenaga *Photovoltaic*

Rian Nurdiansyah¹, Linda Faridah^{2*}, Farradita Nugraha³, Prama Permana⁴

^{1,2}Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Siliwangi, Tasikmalaya, Jawa Barat, Indonesia

⁴Managemen, Fakultas Ekonomi dan Bisnis, Universitas Siliwangi, Tasikmalaya, Jawa Barat, Indonesia

Received: 11-04-2026
Accepted: 21-08-2026

Keywords:
Hydroponic Tower;
Internet of Things (IoT);
Monitoring Nutrisi;
Photovoltaic;
Sistem Kontrol Otomatis

Correspondent Email:
lindafaridah@unsil.ac.id

Abstrak. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi kinerja sistem monitoring Total Dissolved Solids (TDS) dan sirkulasi larutan nutrisi berbasis Internet of Things (IoT) pada hidroponik tower bertenaga photovoltaic. Sistem menggunakan ESP32, sensor TDS, sensor temperatur DS18B20, pompa sirkulasi DC, dashboard IoT, panel photovoltaic, dan baterai. Evaluasi eksperimental meliputi validasi sensor TDS, pengujian kontrol berbasis ambang batas, komunikasi IoT, dan kinerja operasional sistem. Pompa diaktifkan ketika $TDS < 550$ ppm dan dinonaktifkan ketika $TDS \geq 550$ ppm untuk membantu sirkulasi dan homogenisasi larutan. Hasil validasi menunjukkan rata-rata kesalahan sensor TDS sebesar 1,72%. Pengujian komunikasi menunjukkan tingkat keberhasilan pengiriman data sebesar 98,61% dengan delay rata-rata 2,3 detik. Sistem mampu melakukan monitoring TDS dan temperatur secara real-time serta memberikan respons pompa yang konsisten terhadap nilai ambang yang ditetapkan. Integrasi photovoltaic–battery mendukung kebutuhan energi selama pengoperasian. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem mampu mengintegrasikan monitoring, kontrol sirkulasi, komunikasi IoT, dan energi terbarukan untuk mendukung pengelolaan hidroponik yang lebih terukur dan berkelanjutan.

Abstract. This study evaluates the performance of an Internet of Things (IoT)-based Total Dissolved Solids (TDS) monitoring and nutrient-solution circulation system for a photovoltaic-powered hydroponic tower. The system integrates an ESP32, TDS sensor, DS18B20 temperature sensor, DC circulation pump, IoT dashboard, photovoltaic panel, and battery. The experimental evaluation included TDS sensor validation, threshold-based control testing, IoT communication assessment, and operational performance analysis. The pump was activated when $TDS < 550$ ppm and deactivated when $TDS \geq 550$ ppm to support solution circulation and homogenization. The validation results showed an average TDS sensor error of 1.72%. IoT communication testing achieved a data transmission success rate of 98.61% with an average delay of 2.3 s. The system successfully monitored TDS and temperature in real time and provided consistent pump responses to the predefined threshold. The photovoltaic–battery subsystem supported the system's energy requirements during operation. Overall, the proposed system integrates monitoring, circulation control, IoT communication, and renewable energy to support more measurable and sustainable hydroponic management.

1. PENDAHULUAN

Pertanian perkotaan menghadapi tantangan berupa keterbatasan lahan produktif dan kebutuhan untuk menghasilkan pangan secara efisien. Kondisi tersebut mendorong pemanfaatan teknologi budidaya yang dapat menghasilkan tanaman pada ruang terbatas dengan penggunaan sumber daya yang lebih terkontrol [1], [2]. Hidroponik menjadi salah satu pendekatan yang banyak dikembangkan karena tanaman dapat dibudidayakan tanpa tanah dengan pemanfaatan air dan larutan nutrisi yang lebih terukur [3]–[5]. Konfigurasi hidroponik vertikal atau hydroponic tower memiliki keunggulan dalam pemanfaatan ruang karena tanaman disusun secara bertingkat sehingga sesuai untuk penerapan pertanian pada area dengan luas lahan terbatas [6]–[8].

Salah satu aspek penting dalam pengoperasian hidroponik adalah kondisi larutan nutrisi. Konsentrasi zat terlarut, temperatur, dan pH merupakan parameter yang berkaitan dengan kondisi larutan serta lingkungan perakaran tanaman. Pemantauan parameter tersebut secara berkala diperlukan untuk mengetahui perubahan kondisi selama sistem beroperasi [9]–[11]. Pada penerapan konvensional, pemantauan dan pengelolaan kondisi larutan masih dapat melibatkan pemeriksaan secara manual. Pendekatan tersebut memiliki keterbatasan ketika pengamatan perlu dilakukan secara kontinu, terutama karena perubahan kondisi larutan dapat berlangsung sepanjang periode operasi sistem.

Perkembangan Internet of Things (IoT) memberikan peluang untuk melakukan akuisisi dan pemantauan data hidroponik secara lebih kontinu. Sensor dapat digunakan untuk memperoleh parameter kondisi larutan, sedangkan mikrokontroler berfungsi melakukan pemrosesan data dan mengirimkannya melalui jaringan komunikasi ke platform monitoring. Pendekatan ini telah diterapkan pada berbagai sistem hidroponik untuk meningkatkan ketersediaan informasi kondisi tanaman dan mengurangi kebutuhan pengamatan secara langsung [12]–[16]. Namun, keberadaan sistem monitoring berbasis IoT tidak secara otomatis menunjukkan bahwa sistem memiliki kinerja pengukuran dan komunikasi yang memadai. Respons sensor,

konsistensi mekanisme kontrol, serta waktu yang diperlukan untuk mengirimkan data ke platform monitoring perlu dievaluasi secara eksperimental.

Selain aspek monitoring, kebutuhan energi merupakan bagian penting dalam penerapan sistem hidroponik berbasis perangkat elektronik. Sensor, mikrokontroler, perangkat komunikasi, dan pompa memerlukan pasokan listrik selama sistem beroperasi. Pemanfaatan photovoltaic dapat menjadi alternatif sumber energi untuk sistem pertanian skala kecil, khususnya pada aplikasi yang membutuhkan operasi tanpa ketergantungan penuh terhadap jaringan listrik. Integrasi photovoltaic dengan baterai memungkinkan energi yang dihasilkan pada periode penyinaran disimpan dan digunakan untuk mendukung beban sistem pada waktu berikutnya. Meskipun demikian, kemampuan sistem photovoltaic untuk mendukung operasi tidak cukup dinilai hanya berdasarkan keberhasilan sistem menyala, tetapi perlu ditinjau melalui parameter kelistrikan dan keseimbangan antara energi yang dihasilkan dengan energi yang dikonsumsi.

Berdasarkan kajian tersebut, masih diperlukan evaluasi eksperimental yang mengkaji kinerja sistem hidroponik tower secara terpadu dari sisi pengukuran TDS, respons sirkulasi larutan, pemantauan temperatur, komunikasi IoT, serta dukungan catu daya photovoltaic. Evaluasi tersebut penting karena sistem yang mampu melakukan monitoring dan memberikan respons kontrol belum tentu memiliki kinerja pengukuran, komunikasi, dan energi yang memadai untuk operasi yang lebih lama. Selain itu, penggunaan sensor TDS perlu mempertimbangkan validitas hasil pengukuran melalui proses kalibrasi terhadap referensi yang sesuai.

Penelitian ini berfokus pada evaluasi kinerja sistem monitoring TDS dan sirkulasi larutan nutrisi berbasis IoT pada hidroponik tower bertenaga photovoltaic. Sistem menggunakan ESP32 sebagai pengendali, sensor TDS dan temperatur sebagai perangkat pengukuran, pompa sebagai aktuator sirkulasi, dashboard IoT sebagai media pemantauan, serta photovoltaic dan baterai sebagai sumber energi. Berbeda dari pendekatan yang hanya mendemonstrasikan fungsi sistem, penelitian

ini diarahkan untuk mengevaluasi respons pengukuran dan kontrol TDS, karakteristik komunikasi data, serta kemampuan subsistem photovoltaic dalam mendukung kebutuhan energi sistem berdasarkan hasil pengujian. Sistem kontrol yang digunakan merupakan kontrol berbasis ambang batas untuk mengaktifkan atau menonaktifkan pompa sirkulasi sesuai nilai TDS yang terukur. Perlu ditegaskan bahwa pompa pada sistem ini berfungsi untuk mensirkulasikan dan menghomogenkan larutan, bukan sebagai mekanisme nutrient dosing untuk menambahkan konsentrasi nutrisi.

Dengan pendekatan tersebut, penelitian diharapkan dapat memberikan gambaran yang lebih objektif mengenai kinerja aktual sistem, sekaligus mengidentifikasi keterbatasan yang masih perlu diperbaiki sebelum sistem diterapkan pada periode operasi yang lebih panjang. Evaluasi juga mempertimbangkan keterbatasan parameter yang belum dimonitor, khususnya pH, sehingga hasil penelitian tidak digunakan untuk mengklaim pengendalian seluruh kondisi nutrisi hidroponik, melainkan terbatas pada parameter yang benar-benar diukur dan dievaluasi.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Hidroponik Tower dan Pengelolaan Larutan Nutrisi

Hidroponik merupakan metode budidaya tanaman tanpa menggunakan tanah dengan larutan nutrisi sebagai sumber unsur hara bagi tanaman. Sistem ini memungkinkan penggunaan air dan nutrisi dikendalikan secara lebih terukur dibandingkan dengan sistem budidaya konvensional [3]–[5]. Perkembangan hidroponik juga mengarah pada konfigurasi vertikal atau hydroponic tower yang memanfaatkan ruang secara bertingkat sehingga sesuai untuk penerapan pertanian pada area dengan keterbatasan lahan [6]–[8].

Kondisi larutan nutrisi merupakan salah satu aspek yang perlu diperhatikan dalam pengoperasian sistem hidroponik. Konsentrasi zat terlarut dapat dipantau menggunakan parameter Total Dissolved Solids (TDS), sedangkan temperatur larutan dapat digunakan sebagai informasi tambahan mengenai kondisi lingkungan sistem. Sejumlah penelitian telah

memanfaatkan sensor TDS maupun sensor parameter larutan lainnya untuk memperoleh informasi kondisi nutrisi secara langsung [9]–[12]. Pengukuran tersebut dapat menjadi dasar bagi sistem monitoring maupun mekanisme pengambilan keputusan pada sistem hidroponik otomatis.

Namun demikian, nilai TDS tidak secara langsung menunjukkan bahwa seluruh kebutuhan nutrisi tanaman telah terpenuhi. TDS merupakan indikator jumlah zat terlarut dalam larutan dan dapat digunakan sebagai parameter operasional untuk memantau perubahan konsentrasi larutan. Oleh karena itu, penggunaan TDS dalam sistem kontrol perlu disertai dengan batas operasi yang ditentukan sesuai dengan rancangan sistem serta validasi terhadap hasil pengukuran sensor.

2.2 Monitoring Hidroponik Berbasis Internet of Things

Internet of Things (IoT) memungkinkan perangkat sensor, mikrokontroler, jaringan komunikasi, dan platform perangkat lunak diintegrasikan untuk memperoleh serta menyajikan data secara jarak jauh. Dalam penerapan hidroponik, teknologi tersebut dapat digunakan untuk mengumpulkan data kondisi larutan dan menampilkannya pada dashboard sehingga pengguna tidak harus melakukan pemeriksaan secara langsung [12]–[16].

ESP32 merupakan salah satu mikrokontroler yang sesuai untuk aplikasi tersebut karena memiliki kemampuan komunikasi nirkabel yang dapat digunakan untuk mengirimkan data sensor melalui jaringan internet. Integrasi sensor dengan mikrokontroler memungkinkan proses akuisisi dan pengolahan data dilakukan secara periodik, sedangkan platform IoT dapat digunakan sebagai media visualisasi dan penyimpanan informasi hasil pengukuran.

Meskipun demikian, keberhasilan pengiriman data ke dashboard tidak hanya ditentukan oleh kemampuan perangkat untuk terhubung ke internet. Kinerja komunikasi juga dipengaruhi oleh waktu yang dibutuhkan sejak data diperoleh sensor hingga data diterima dan ditampilkan pada platform monitoring. Oleh sebab itu, evaluasi sistem IoT sebaiknya tidak hanya didasarkan pada keberadaan data pada dashboard, tetapi juga mempertimbangkan

karakteristik komunikasi seperti kontinuitas pengiriman dan delay data.

2.3 Kontrol berbasis ambang batas (Threshold-Based Control)

Kontrol Berbasis Ambang Batas pada Sistem Hidroponik merupakan pendekatan sederhana yang menggunakan nilai parameter tertentu sebagai dasar pengambilan keputusan terhadap aktuator. Pendekatan ini telah digunakan pada berbagai aplikasi otomatisasi hidroponik karena memiliki struktur algoritma yang sederhana dan relatif mudah diimplementasikan pada mikrokontroler dengan sumber daya komputasi terbatas [6], [12], [14]. Dalam penelitian ini, nilai TDS digunakan sebagai parameter keputusan untuk mengendalikan pompa sirkulasi larutan. Ketika nilai TDS berada di bawah ambang yang ditetapkan, pompa diaktifkan untuk mensirkulasikan larutan, sedangkan ketika nilai TDS mencapai atau melebihi ambang tersebut, pompa dinonaktifkan. Mekanisme ini harus dibedakan dari sistem nutrient dosing. Pompa sirkulasi hanya berfungsi menggerakkan dan menghomogenkan larutan yang tersedia sehingga tidak secara langsung menambahkan unsur hara ke dalam larutan.

2.4 Sensor TDS dan Kebutuhan Kalibrasi

Sensor TDS digunakan untuk memperoleh indikasi konsentrasi zat terlarut dalam larutan melalui pengukuran karakteristik listrik larutan. Dalam sistem hidroponik berbasis IoT, sensor TDS dapat menjadi salah satu sumber data utama untuk pemantauan kondisi larutan dan pengambilan keputusan kontrol [9]–[11]. Akan tetapi, hasil pembacaan sensor tidak dapat langsung dianggap sebagai nilai referensi tanpa mempertimbangkan karakteristik sensor dan kondisi pengukuran. Perbedaan antara nilai yang dibaca sensor dengan nilai sebenarnya dapat dipengaruhi oleh proses kalibrasi, karakteristik larutan, temperatur, serta kondisi sensor. Oleh karena itu, validasi terhadap alat atau larutan standar diperlukan untuk mengetahui kesesuaian pembacaan sensor sebelum data digunakan sebagai dasar evaluasi sistem kontrol. Dalam konteks penelitian ini, kalibrasi sensor TDS menjadi bagian penting karena nilai ambang batas digunakan sebagai dasar pengoperasian

pompa. Kesalahan pembacaan sensor pada daerah sekitar nilai ambang dapat menyebabkan keputusan aktuator tidak sesuai dengan kondisi larutan sebenarnya. Dengan demikian, evaluasi sensor dan evaluasi respons kontrol perlu dipandang sebagai dua aspek yang saling berkaitan.

2.5 Photovoltaic-Battery sebagai Sumber Energi Sistem Hidroponik

Pemanfaatan photovoltaic pada sistem pertanian memberikan alternatif sumber energi untuk perangkat elektronik berdaya relatif rendah, seperti sensor, mikrokontroler, perangkat komunikasi, dan pompa. Integrasi panel photovoltaic dengan baterai memungkinkan energi listrik yang dihasilkan selama periode penyinaran disimpan untuk digunakan ketika daya dari panel tidak mencukupi. Pada sistem yang menggunakan photovoltaic-battery, kemampuan sumber energi tidak cukup dievaluasi hanya berdasarkan keberhasilan perangkat beroperasi. Evaluasi yang lebih representatif memerlukan perbandingan antara energi yang dihasilkan oleh panel dengan kebutuhan energi beban. Parameter seperti tegangan, arus, daya photovoltaic, kapasitas baterai, konsumsi daya beban, serta durasi operasi dapat digunakan untuk menilai kecukupan energi sistem. Pendekatan tersebut penting terutama ketika sistem dirancang untuk beroperasi tanpa ketergantungan terhadap jaringan listrik. Klaim mengenai kemampuan operasi mandiri harus didukung oleh data pengukuran dan analisis neraca energi, bukan hanya berdasarkan keberhasilan sistem beroperasi dalam waktu pengujian yang singkat.

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode evaluasi eksperimental untuk menganalisis kinerja sistem monitoring Total Dissolved Solids (TDS) dan sirkulasi larutan nutrisi berbasis Internet of Things (IoT) pada hidroponik tower dengan sumber energi photovoltaic. Evaluasi dilakukan terhadap karakteristik pengukuran TDS dan temperatur, respons sistem terhadap perubahan nilai TDS, kinerja komunikasi data, serta karakteristik penggunaan energi selama sistem beroperasi. Tahapan penelitian meliputi persiapan sistem,

validasi sensor TDS, pengujian mekanisme kontrol, pengambilan data operasional, dan analisis kinerja. Setiap parameter pengujian dicatat berdasarkan waktu pengamatan yang sama sehingga hubungan antara kondisi larutan, status pompa, komunikasi IoT, dan kondisi sumber energi dapat dianalisis secara terpadu.

3.1 Rancangan Evaluasi Sistem

Rancangan penelitian disusun untuk mengevaluasi sistem berdasarkan hasil pengukuran aktual. Tahapan penelitian meliputi persiapan perangkat, validasi sensor TDS, verifikasi mekanisme kontrol, pengujian operasional, akuisisi data, dan analisis hasil.



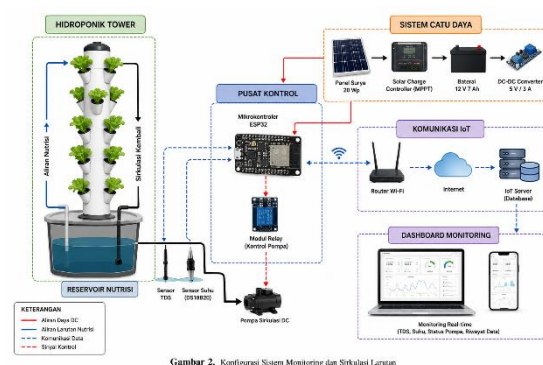
Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

Pada tahap persiapan dilakukan pemeriksaan terhadap sensor, mikrokontroler, pompa, sistem komunikasi, photovoltaic, dan baterai. Sensor TDS kemudian divalidasi

menggunakan larutan dengan nilai referensi sebelum digunakan sebagai parameter pengendalian. Pengujian operasional dilakukan dengan menjalankan sistem pada kondisi kerja normal. Selama pengujian, nilai TDS, temperatur larutan, status pompa, parameter kelistrikan, dan data komunikasi dicatat secara berkala. Data tersebut selanjutnya digunakan untuk mengevaluasi karakteristik sistem selama periode operasi.

3.2 Konfigurasi Sistem dan Parameter Pengukuran

Sistem hidroponik tower menggunakan ESP32 sebagai pengendali utama yang berfungsi membaca sensor, menjalankan mekanisme kontrol, dan mengirimkan data melalui jaringan internet. Sensor TDS digunakan untuk mengukur konsentrasi zat terlarut dalam larutan, sedangkan sensor DS18B20 digunakan untuk mengukur temperatur larutan. Pompa DC digunakan untuk mensirkulasikan larutan nutrisi pada sistem hidroponik. Sistem catu daya terdiri atas panel photovoltaic berkapasitas 20 Wp, baterai 12 V 7 Ah, dan solar charge controller berbasis MPPT. Energi yang dihasilkan photovoltaic digunakan untuk mendukung kebutuhan perangkat elektronik dan pompa, sedangkan baterai berfungsi sebagai penyimpan energi.



Gambar 2. Konfigurasi Sistem Monitoring dan Sirkulasi Larutan

Gambar 2. Konfigurasi Sistem Monitoring dan Sirkulasi Larutan

Parameter yang digunakan dalam pengujian ditunjukkan pada Tabel 1

Tabel 1. Parameter Pengukuran Sistem

No.	Parameter	Perangkat/Metode	Satuan	Fungsi
1	TDS	Sensor TDS	ppm	Mengukur konsentrasi zat terlarut
2	Temperatur	DS18B20	°C	Mengukur temperatur larutan
3	Status pompa	ESP32	ON/OFF	Menunjukkan kondisi aktuator
4	Tegangan photovoltaic	Pengukuran tegangan	V	Menentukan tegangan keluaran PV
5	Arus photovoltaic	Pengukuran arus	A	Menentukan arus keluaran PV
6	Tegangan baterai	Pengukuran tegangan	V	Memantau kondisi baterai
7	Arus beban	Pengukuran arus	A	Menentukan kebutuhan arus sistem
8	Daya photovoltaic	Perhitungan (V×I)	W	Menentukan daya PV
9	Energi sistem	Integrasi daya	Wh	Menentukan kebutuhan/produksi energi
10	Waktu komunikasi	Timestamp	s	Menentukan waktu tunda data
11	Durasi operasi	Pencatatan waktu	jam	Menentukan lama operasi sistem

Pengukuran dilakukan secara periodik dan setiap data diberi *timestamp* untuk mempertahankan kesesuaian waktu antara data sensor, status pompa, parameter energi, dan data yang diterima pada dashboard.

3.3 Validasi Sensor TDS dan Mekanisme Kontrol

Validasi sensor TDS dilakukan dengan membandingkan hasil pembacaan sensor terhadap nilai referensi pada beberapa tingkat konsentrasi. Pengujian dilakukan pada rentang yang mencakup kondisi operasi sistem, terutama daerah di sekitar nilai ambang pengendalian. Persentase kesalahan pembacaan dihitung menggunakan persamaan:

$$Error (\%) = \left| \frac{X_a - X_r}{X_r} \right| \times 100\%$$

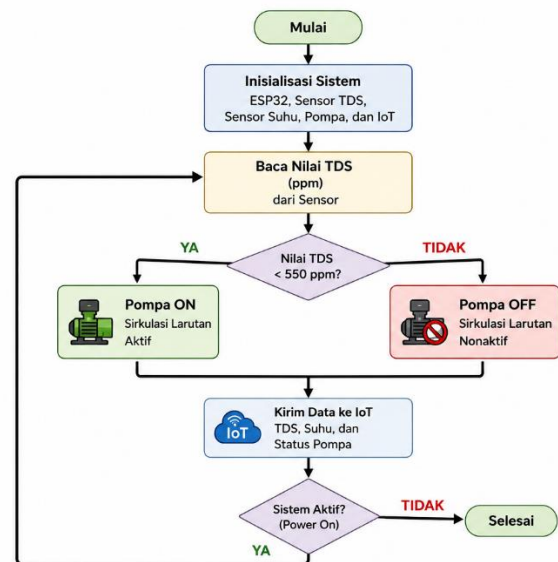
Dengan X_a merupakan nilai pembacaan sensor dan X_r merupakan nilai referensi

Tabel 2. Pengujian Validasi Sensor TDS

No.	Nilai Referensi (ppm)	Pembacaan Sensor (ppm)	Selisih (ppm)	Error (%)
1	342	348	6	1,75
2	500	508	8	1,60
3	700	712	12	1,71
4	1000	1018	18	1,80
Rata-rata	—	—	11	1,72

Berdasarkan hasil pengujian tersebut, nilai kesalahan pembacaan berada pada rentang

1,60–1,80% dengan rata-rata sebesar 1,72%. Hasil validasi digunakan sebagai dasar untuk menilai kesesuaian sensor dalam pengukuran TDS selama pengujian sistem. Nilai TDS digunakan sebagai parameter untuk menentukan kondisi operasi pompa. Nilai ambang ditetapkan sebesar **550 ppm** dengan aturan:



Gambar 3. Diagram Logika Kontrol Berdasarkan Nilai TDS

Pompa digunakan untuk mensirkulasikan larutan nutrisi sehingga larutan dapat bergerak melalui sistem hidroponik dan mengalami homogenisasi. Pompa tidak digunakan sebagai perangkat *nutrient dosing*, sehingga perubahan

status pompa tidak diartikan sebagai proses penambahan nutrisi secara langsung.

3.4 Pengujian Operasional dan Akuisisi Data

Pengujian operasional dilakukan dengan mengoperasikan sistem pada kondisi kerja normal dan melakukan pencatatan parameter secara periodik. Data yang diperoleh digunakan untuk mengamati perubahan kondisi larutan, respons pompa, kondisi sumber energi, dan komunikasi IoT. Pada pengujian awal, sistem diamati selama 35 menit dengan interval lima menit. Data hasil pengamatan awal ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Data Pengujian Operasional

Waktu (menit)	TDS (ppm)	Temperatur (°C)	Status Pompa
0	480	27,1	ON
5	510	27,3	ON
10	560	27,5	OFF
15	600	27,8	OFF
20	650	28,0	OFF
25	700	28,2	OFF
30	550	27,9	OFF
35	600	27,6	OFF

Data TDS dan temperatur digunakan untuk mengetahui perubahan kondisi larutan selama pengoperasian. Status pompa digunakan untuk mengevaluasi kesesuaian respons aktuator terhadap nilai ambang TDS. Untuk pengujian dengan durasi lebih panjang, pencatatan dilakukan terhadap TDS, temperatur, status pompa, tegangan photovoltaic, arus photovoltaic, tegangan baterai, arus beban, serta data komunikasi IoT. Seluruh parameter dicatat dengan *timestamp* yang sama sehingga dapat dianalisis berdasarkan waktu.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Pengujian Sensor dan Sistem Kontrol

Pengujian dilakukan untuk mengetahui kemampuan sistem dalam membaca kondisi larutan dan memberikan respons terhadap perubahan nilai TDS. Sensor TDS digunakan sebagai parameter utama dalam menentukan kondisi operasi pompa, sedangkan sensor temperatur digunakan untuk memantau

perubahan temperatur larutan selama sistem bekerja. Hasil pengujian menunjukkan adanya perubahan nilai TDS selama periode pengamatan. Nilai TDS digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan sistem, dengan batas pengendalian sebesar 550 ppm. Ketika nilai TDS berada di bawah batas tersebut, sistem mengaktifkan pompa sirkulasi, sedangkan ketika nilai TDS telah mencapai atau melebihi batas, pompa dihentikan.

Tabel 4. Hasil Pengujian TDS, Temperatur, dan Respons Pompa

Waktu	TDS (ppm)	Temperatur (°C)	Status Pompa
0 menit	480	27,1	ON
5 menit	510	27,3	ON
10 menit	560	27,5	OFF
15 menit	600	27,8	OFF
20 menit	650	28,0	OFF
25 menit	700	28,2	OFF
30 menit	540	27,9	ON
35 menit	520	27,6	ON

Berdasarkan Tabel 4, pompa aktif ketika nilai TDS berada di bawah 550 ppm dan berhenti ketika nilai TDS mencapai atau melebihi batas tersebut. Pola perubahan ini menunjukkan bahwa mekanisme kontrol dapat memberikan respons terhadap kondisi larutan berdasarkan parameter TDS. Nilai TDS mengalami perubahan selama pengujian, sedangkan temperatur relatif berada pada rentang yang sempit. Perubahan temperatur yang relatif kecil menunjukkan bahwa kondisi termal larutan tidak mengalami perubahan besar selama periode pengamatan. Meskipun demikian, hubungan antara temperatur dan perubahan TDS belum dianalisis lebih lanjut karena temperatur dalam penelitian ini digunakan sebagai parameter monitoring pendukung.

Validasi sensor TDS dilakukan dengan membandingkan pembacaan sensor terhadap larutan referensi. Hasil validasi digunakan untuk mengetahui tingkat penyimpangan sensor sebelum data TDS digunakan dalam proses pengambilan keputusan.

Tabel 5. Hasil Validasi Sensor TDS

No.	Nilai Referensi (ppm)	Pembacaan Sensor (ppm)	Error (%)
1	342	348	1,75
2	500	508	1,60
3	700	712	1,71
4	1000	1018	1,80
Rata-rata			1,72

Hasil validasi menunjukkan bahwa sensor memiliki penyimpangan pembacaan yang relatif kecil pada rentang pengujian. Nilai kesalahan rata-rata sebesar 1,72% menunjukkan bahwa sensor dapat digunakan untuk memperoleh informasi perubahan TDS pada sistem. Validasi pada rentang sekitar 500–700 ppm juga penting karena nilai tersebut berada di sekitar batas pengambilan keputusan pompa.

4.2 Hasil Monitoring IoT dan Kinerja Operasional Sistem

Sistem monitoring memungkinkan data TDS dan temperatur dikirimkan dari ESP32 menuju dashboard IoT. Data yang diterima kemudian ditampilkan dalam bentuk informasi numerik sehingga kondisi larutan dapat dipantau dari jarak jauh.



Gambar 4. Tampilan Dashboard Monitoring TDS dan Temperatur

Pengujian komunikasi dilakukan untuk mengetahui keberhasilan pengiriman data dan waktu yang dibutuhkan sejak data dikirim hingga diterima oleh dashboard. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sebagian besar data berhasil diterima oleh dashboard. Tingkat keberhasilan pengiriman mencapai 98,61%, sedangkan waktu tunda komunikasi berada pada rentang 1,2–4,8 detik dengan rata-rata 2,3 detik. Variasi *delay* menunjukkan bahwa

komunikasi data tidak sepenuhnya konstan. Kondisi jaringan internet dapat menyebabkan perbedaan waktu penerimaan data meskipun interval pembacaan sensor tetap. Oleh karena itu, dashboard digunakan terutama sebagai media monitoring, sedangkan keputusan pengoperasian pompa dilakukan secara lokal pada ESP32 berdasarkan data TDS.

Tabel 6. Hasil Pengujian Komunikasi IoT

Parameter	Hasil
Jumlah data dikirim	432
Jumlah data diterima	426
Keberhasilan pengiriman	98,61%
Delay minimum	1,2 s
Delay maksimum	4,8 s
Delay rata-rata	2,3 s

Pengujian operasional juga dilakukan untuk melihat kemampuan sistem mempertahankan fungsi monitoring dan kontrol selama sistem berjalan. Selama pengujian, ESP32 melakukan pembacaan sensor secara periodik, memproses nilai TDS, menentukan status pompa, dan mengirimkan informasi pengukuran ke dashboard.

Hasil tersebut menunjukkan bahwa integrasi sensor, pengendali, aktuator, dan komunikasi IoT dapat menjalankan fungsi monitoring dan kontrol secara terpadu. Namun, kinerja sistem dalam penelitian ini dinilai berdasarkan parameter yang terukur dan belum mencakup evaluasi pertumbuhan tanaman atau perubahan hasil produksi.

4.3 Hasil Evaluasi Photovoltaic-Battery

Evaluasi sumber energi dilakukan untuk mengetahui kemampuan photovoltaic-battery dalam mendukung kebutuhan operasional sistem. Sistem menggunakan panel photovoltaic 20 Wp yang terhubung dengan baterai 12 V 7 Ah. Parameter yang diamati meliputi tegangan photovoltaic, arus photovoltaic, daya photovoltaic, tegangan baterai, dan konsumsi energi sistem.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa keluaran photovoltaic berubah selama periode pengamatan. Daya maksimum yang diperoleh berada pada kisaran 18,5–19,8 W, sedangkan energi harian rata-rata mencapai 55,4 Wh. Perubahan keluaran tersebut merupakan karakteristik yang umum pada sistem photovoltaic karena daya yang tersedia

bergantung pada kondisi penyinaran selama pengoperasian.

Tabel 7. Hasil Pengukuran Kinerja Energi

Parameter	Hari 1	Hari 2	Hari 3	Rata-rata
Tegangan PV minimum (V)	16,8	16,5	16,9	16,7
Tegangan PV maksimum (V)	20,1	19,8	20,3	20,1
Arus PV maksimum (A)	0,96	1,02	0,91	0,96
Daya PV maksimum (W)	19,3	19,8	18,5	19,2
Energi PV harian (Wh)	52,8	58,4	55,1	55,4
Tegangan baterai minimum (V)	12,1	12,2	12,1	12,1
Tegangan baterai maksimum (V)	13,7	13,8	13,7	13,7
Daya beban maksimum (W)	9,9	10,2	9,6	9,9
Energi beban harian (Wh)	39,6	40,8	40,1	40,2
Neraca energi (Wh)	+13,2	+17,6	+15,0	+15,3

Kebutuhan energi sistem berada pada kisaran 39,6–40,8 Wh per hari dengan rata-rata 40,2 Wh. Berdasarkan data tersebut, energi photovoltaic yang tersedia lebih besar dibandingkan kebutuhan energi selama tiga hari pengamatan. Kondisi ini menghasilkan neraca energi rata-rata sebesar 15,3 Wh per hari.

Baterai berfungsi sebagai penyimpan energi yang menjaga kontinuitas suplai ketika keluaran photovoltaic mengalami penurunan. Tegangan baterai berada pada rentang 12,1–13,8 V selama periode pengujian. Namun, hasil tersebut belum cukup untuk menyatakan kemampuan sistem beroperasi mandiri dalam jangka panjang karena diperlukan pengujian dengan periode yang lebih panjang dan kondisi cuaca yang bervariasi

Secara keseluruhan, hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem dapat mengintegrasikan monitoring TDS dan

temperatur, kontrol sirkulasi berbasis ambang TDS, komunikasi IoT, dan sumber energi photovoltaic-battery dalam satu sistem. Sistem belum mencakup pengukuran pH dan belum memiliki mekanisme untuk menurunkan TDS ketika konsentrasi terlalu tinggi.

5. KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa sistem monitoring TDS dan sirkulasi larutan nutrisi berbasis Internet of Things (IoT) pada hidroponik tower dapat diimplementasikan dengan mengintegrasikan ESP32, sensor TDS, sensor temperatur DS18B20, pompa sirkulasi DC, dashboard IoT, serta sumber energi photovoltaic-battery. Validasi sensor TDS menghasilkan rata-rata kesalahan sebesar 1,72%, sehingga sensor dapat digunakan untuk memantau perubahan konsentrasi larutan pada rentang pengujian. Mekanisme kontrol berbasis ambang batas mampu memberikan respons yang konsisten, yaitu pompa aktif ketika TDS < 550 ppm dan berhenti ketika TDS ≥ 550 ppm. Komunikasi IoT mencapai tingkat keberhasilan pengiriman data sebesar 98,61% dengan delay rata-rata 2,3 detik, sehingga mendukung pemantauan TDS dan temperatur secara real-time. Secara keseluruhan, sistem mampu mengintegrasikan fungsi monitoring, kontrol sirkulasi, komunikasi IoT, dan dukungan energi photovoltaic. Pengembangan selanjutnya perlu mencakup monitoring pH, nutrient dosing otomatis, serta pengujian energi dalam periode yang lebih panjang.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. K. Pattnaik *Et Al.*, “Urban Agriculture Through Iot-Based Resilient Hydroponic Farming — A Machine Learning Approach,” *J. Mob. Multimed.*, Vol. 21, No. 6, Pp. 1049–1070, 2025, Doi: 10.13052
- [2] A. Becerra-Ramirez, A. Merino-Gonzalez, And K. Acuna-Condori, “Greening Urban Living: Designing An Intelligent Hydroponic System With Automatic Nutrient Regulation For Small-Space Agriculture,” In *2023 Ieee Xxx International Conference On Electronics, Electrical Engineering And Computing (Intercon)*, 2023, Pp. 1–7, Doi: 10.1109/Intercon59652.2023.10326065.
- [3] M. Dutta *Et Al.*, “Internet Of Things-Based Smart Precision Farming In Soilless Agriculture: Opportunities And Challenges For Global Food Security,” *Ieee Access*, Vol.

- 13, Pp. 34238–34268, 2025, Doi: 10.1109/Access.2025.3540317.
- [4] M. N. Reza *Et Al.*, “Trends Of Soil And Solution Nutrient Sensing For Open Field And Hydroponic Cultivation In Facilitated Smart Agriculture,” *Sensors*, Vol. 25, No. 2. P. 453, 2025, Doi: 10.3390/S25020453.
- [5] C. L. Kok, I. M. Kusuma, Y. Y. Koh, H. Tang, And A. B. Lim, “Smart Aquaponics: An Automated Water Quality Management System For Sustainable Urban Agriculture,” *Electronics*, Vol. 13, No. 5. P. 820, 2024, Doi: 10.3390/Electronics13050820.
- [6] J. A. Dela Vega, J. A. Gonzaga, And L. A. Gan Lim, “Fuzzy-Based Automated Nutrient Solution Control For A Hydroponic Tower System,” *Iop Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, Vol. 1109, No. 1, P. 12064, 2021, Doi: 10.1088/1757-899x/1109/1/012064.
- [7] G. W. Michael, F. S. Tay, And Y. L. Then, “Development Of Automated Monitoring System For Hydroponics Vertical Farming,” *J. Phys. Conf. Ser.*, Vol. 1844, No. 1, P. 12024, 2021, Doi: 10.1088/1742-6596/1844/1/012024.
- [8] M. E. H. Chowdhury *Et Al.*, “Design, Construction And Testing Of Iot Based Automated Indoor Vertical Hydroponics Farming Test-Bed In Qatar,” *Sensors*, Vol. 20, No. 19. P. 5637, 2020, Doi: 10.3390/S20195637.
- [9] W.-J. Cho, H.-J. Kim, D.-H. Jung, D.-W. Kim, T. I. Ahn, And J.-E. Son, “On-Site Ion Monitoring System For Precision Hydroponic Nutrient Management,” *Comput. Electron. Agric.*, Vol. 146, Pp. 51–58, 2018, Doi: <https://doi.org/10.1016/J.Compag.2018.01.019>.
- [10] T. Sangeetha And E. Periyathambi, “Automatic Nutrient Estimator: Distributing Nutrient Solution In Hydroponic Plants Based On Plant Growth,” *Peerj Comput. Sci.*, Vol. 10, P. E1871, 2024, Doi: 10.7717/Peerj-Cs.1871.
- [11] S. L. Ching, T. F. Siang, A. Chai, And C. P. Ching, “Design And Develop An Iot Automated Nutrient Control In A Hydroponic System,” Pp. 18–25, 2025, Doi: 10.55670/FpII.Fusus.3.3.3.
- [12] P. Rao *Et Al.*, “Automated Iot Solutions For Efficient Hydroponic Farming: Nutrients, Ph And Lighting Management,” *J. Eur. Des Systèmes Autom.*, Vol. 57, Pp. 1273–1283, Oct. 2024, Doi: 10.18280/Jesa.570503.
- [13] S. Devaraju, D. Muthusamy, S. Kenchappa Chandrappa, C. Jathar, S. Banothu, And A. Atheeswaran, “Smart Hydroponic Farming System Using Iot-Integrated Deep Learning For Real-Time Nutrient Monitoring And Climate Control,” *Ecohydrol. Hydrobiol.*, Vol. 26, No. 2, P. 100754, 2026, Doi: <https://doi.org/10.1016/J.Ecohyd.2026.100754>.
- [14] K. Bouarroudj, F. Babaa, And A. Touil, “Iot-Based Monitoring And Control For Optimized Plant Growth In Smart Greenhouses Using Soil And Hydroponic Systems,” *Internet Of Things*, Vol. 33, P. 101710, 2025, Doi: <https://doi.org/10.1016/J.Iot.2025.101710>.
- [15] U. Paliania And M. Kumar, “Automated Monitoring Of Hydroponic System Using Iot And Cloud Based Technology For Sustainable Agriculture,” In *2024 1st International Conference On Advanced Computing And Emerging Technologies (Acet)*, 2024, Pp. 1–7, Doi: 10.1109/Acet61898.2024.10729937.
- [16] T. Akter, T. Mahmud, R. Chakma, N. Datta, M. S. Hossain, And K. Andersson, “Smart Monitoring And Control Of Hydroponic Systems Using Iot Solutions,” In *2024 Second International Conference On Inventive Computing And Informatics (Icici)*, 2024, Pp. 761–767, Doi: 10.1109/Icici62254.2024.00128.
- [17] M. Fahri And E. A. Yulanda, “Sistem Monitoring Dan Otomatisasi Proses Pemeraman Buah Pisang Pisasasi Internet Of Things (Iot),” *Electr. J. Rekayasa Dan Teknol. Elektro*, Vol. 19, No. 03, 2025.
- [18] S. Verma *Et Al.*, “A Review On Hydroponics And Vertical Farming For Vegetable Cultivation: Innovations And Challenges,” *J. Exp. Agric. Int.*, Vol. 46, Pp. 801–821, Dec. 2024, Doi: 10.9734/Jeai/2024/V46i123190.
- [19] Y. S. Goh, Y. C. Hum, Y. L. Lee, K. W. Lai, W.-S. Yap, And Y. K. Tee, “A Meta-Analysis: Food Production And Vegetable Crop Yields Of Hydroponics,” *Sci. Hortic. (Amsterdam)*, Vol. 321, P. 112339, 2023, Doi: <https://doi.org/10.1016/J.Scienta.2023.112339>.
- [20] E. Dorr, B. Goldstein, A. Horvath, C. Aubry, And B. Gabrielle, “Environmental Impacts And Resource Use Of Urban Agriculture: A Systematic Review And Meta-Analysis,” *Environ. Res. Lett.*, Vol. 16, No. 9, P. 93002, 2021, Doi: 10.1088/1748-9326/Ac1a39.
- [21] R. Naresh, S. K. Jadav, And M. Singh, “Role Of Hydroponics In Improving Water-Use Efficiency And Food Security,” Vol. 14, No. 2, Pp. 608–633, 2024, Doi: 10.9734/Ijecc/2024/V14i23976.