

PERANCANGAN APLIKASI SMART HYDROPONICS DALAM RUANGAN BERBASIS INTERNET OF THINGS MENGGUNAKAN METODE PROTOTYPING

Oleh:

Bagus Muhammad Akbar^{1*}, Abdul Fadlil², Sunardi³

^{1,2,3}Program Doktor Informatika, Universitas Ahmad Dahlan, Yogyakarta, Indonesia

¹Program Studi Informatika, Universitas Pembangunan Nasional Veteran Yogyakarta

e-mail: ^{1*}2536083028@webmail.uad.ac.id, ²fadlil@uad.ac.id, ³sunardi@uad.ac.id

Abstrak: Pertumbuhan populasi dan keterbatasan lahan mendorong pengembangan pertanian alternatif yang efisien. Hidroponik dalam ruangan merupakan solusi inovatif untuk budidaya tanaman tanpa tanah, namun pengelolaan parameter lingkungan seperti pH, TDS/EC, suhu, kelembapan, CO₂, dan tVOC secara manual tidak efisien. Penelitian ini merancang sistem SHINS (Smart Hydroponics Indoor System) berbasis Internet of Things (IoT) menggunakan metode prototyping. Sistem memanfaatkan mikrokontroler ESP32 yang terhubung dengan sensor pH, TDS/EC, DS18B20, DHT21, dan SGP30, serta aktuator berupa pompa peristaltik dan grow light. Data dikirimkan via protokol MQTT ke broker Mosquitto, disimpan di database Supabase dan divisualisasikan melalui web dashboard responsif yang dapat diakses secara real-time. Sistem mendukung dua mode operasi: Manual dan Auto (rule engine). Metode prototyping diterapkan secara iteratif dalam tiga siklus. Pengujian menunjukkan akurasi sensor pH rata-rata error 0,1 unit, TDS/EC 1,2 ppm, suhu air 0,2 °C, dan kelembapan 1,5% sehingga memiliki akurasi 97%. Seluruh fitur dashboard berhasil divalidasi dengan delay pembaruan rata-rata 1,3 detik. Sistem ini diharapkan mendukung pengelolaan hidroponik indoor secara otonom dan presisi berbasis teknologi.

Kata kunci: Dashboard IoT, Hidroponik Indoor, ESP32, MQTT, Metode Prototyping

Abstract: The growing population and limited land availability are driving the development of efficient alternative farming methods. Indoor hydroponics is an innovative soilless cultivation solution; however, manually managing environmental parameters such as pH, TDS/EC, temperature, humidity, CO₂, and tVOC is inefficient. This study designs the SHINS (Smart Hydroponics Indoor System) system based on the Internet of Things (IoT) using the prototyping method. The system utilizes an ESP32 microcontroller connected to pH, TDS/EC, DS18B20, DHT21, and SGP30 sensors, along with actuators including peristaltic pumps and a grow light. Data is transmitted via the MQTT protocol to a Mosquitto broker, stored in a Supabase database, and visualized through a responsive real-time web dashboard. The system supports two operating modes: Manual and Auto (rule engine). The prototyping method was applied iteratively in three cycles. Testing showed average pH sensor error of 0.1 units, TDS/EC 1.2ppm, water temperature 0.2°C, and humidity 1.5% so it has accuracy 97%. All dashboard features were successfully validated with an average update delay of 1.3 seconds. This system is expected to support autonomous and precision indoor hydroponics management.

Keywords: IoT Dashboard; Indoor Hydroponics; ESP32; MQTT; Prototyping Method

1. PENDAHULUAN

Kebutuhan pangan dunia yang terus meningkat seiring pertumbuhan populasi menghadapi tantangan serius berupa menyempitnya lahan pertanian akibat alih fungsi menjadi kawasan permukiman dan industri [1]. Di sisi lain, urbanisasi yang pesat mendorong munculnya

konsep pertanian perkotaan (*urban farming*) sebagai solusi ketahanan pangan berbasis lahan terbatas. Salah satu metode yang paling menjanjikan dalam *urban farming* adalah hidroponik, yakni teknik budidaya tanaman tanpa media tanah yang memanfaatkan larutan nutrisi sebagai sumber makanan bagi tanaman [2].

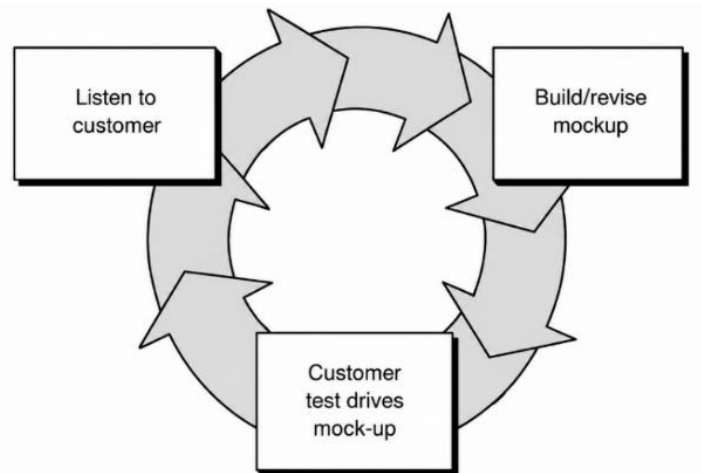
Hidroponik dalam ruangan (*indoor hydroponics*) menawarkan keunggulan berupa kendali lingkungan yang lebih penuh, tidak tergantung musim, dan produktivitas yang lebih tinggi dibandingkan pertanian konvensional. Komoditas seperti sawi pagoda sangat cocok dibudidayakan secara *indoor* karena memiliki daur hidup pendek dan kebutuhan cahaya yang dapat dipenuhi oleh *grow light* berbasis LED *full-spectrum* [3]. Namun demikian, keberhasilan budidaya hidroponik *indoor* sangat bergantung pada kemampuan menjaga kestabilan sejumlah parameter lingkungan, antara lain pH larutan, *Total Dissolved Solids* (TDS), *Electrical Conductivity* (EC), suhu air, suhu ruangan, kelembapan relatif (RH), serta konsentrasi CO₂ dan senyawa organik volatil (tVOC) [4] [5]. Penelitian sebelumnya telah menunjukkan bahwa deviasi pH larutan nutrisi sebesar 0,5 unit dari nilai optimal dapat menurunkan laju pertumbuhan tanaman hingga 20%, sementara ketidakstabilan nilai EC berpengaruh langsung terhadap penyerapan unsur hara makro dan mikro oleh akar tanaman [6].

Pemantauan dan pengendalian parameter-parameter tersebut secara manual sangat tidak efisien, rawan kesalahan, dan tidak memungkinkan pengawasan kontinu selama 24 jam. Teknologi *Internet of Things* (IoT) hadir sebagai solusi yang mampu mengotomasi proses pengumpulan data sensor, pengiriman data melalui jaringan internet, penyimpanan di *cloud*, serta visualisasi melalui *dashboard* interaktif [7]. Implementasi IoT pada pertanian presisi terbukti meningkatkan efisiensi penggunaan air hingga 30% dan mengurangi konsumsi pupuk hingga 25% dibandingkan metode konvensional, sekaligus memungkinkan pemantauan jarak jauh tanpa kehadiran fisik operator [8]. Protokol MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*) dipilih karena sifatnya yang ringan, andal, dan sesuai untuk kondisi jaringan dengan bandwidth terbatas [9]. Protokol MQTT menggunakan model *publish/subscribe* yang memungkinkan komunikasi asinkron sehingga perangkat dengan sumber daya terbatas seperti mikrokontroler ESP32 dapat beroperasi secara efisien tanpa membebani jaringan [10]. Pada penelitian sebelumnya tentang sistem kontrol dan monitoring tanaman hidroponik berbasis *Internet of Things* (IoT) menggunakan sensor TDS dan sistem kontrol air, sedangkan penelitian sistem monitoring suhu [11], kelembapan dan kandungan nutrisi Budidaya Tanaman Sawi Caisim Hidroponik Berbasis IoT menggunakan sensor suhu kelembapan dan kontrol nutrisi [12]. Pada penelitian ini mengusulkan kombinasi sensor yang lebih lengkap dengan menambah sensor pH, EC dan juga CO₂ dan menggabungkan kontrol air dan nutrisi yang merupakan hal yang penting dalam budidaya tanaman hidroponik.

Penelitian ini merancang dan mengimplementasikan *Smart Hydroponics Indoor System* (SHINS) menggunakan metode *prototyping* dengan arsitektur IoT empat lapis: *Sensing Layer*, *Network Layer*, *Processing Layer*, dan *Application Layer* [13]. Metode *prototyping* dipilih karena memungkinkan pengembangan secara iteratif berdasarkan masukan pengguna sehingga sistem akhir benar-benar sesuai kebutuhan lapangan [14].

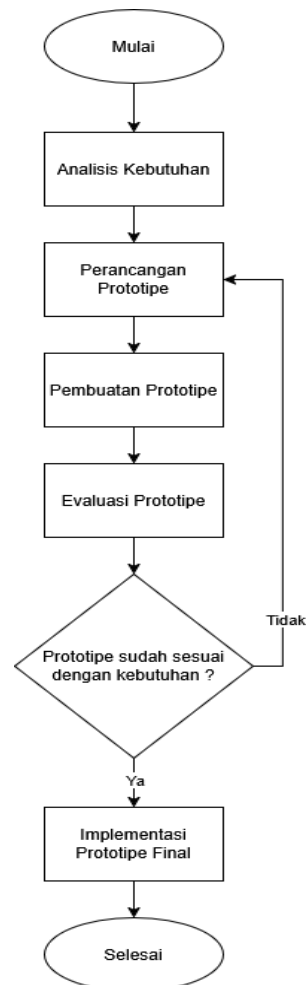
2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode *prototyping* dalam pengembangan sistem SHINS. Tahapan metode *prototyping* yang diterapkan meliputi: (1) analisis kebutuhan, (2) perancangan prototipe, (3) pembuatan prototipe, (4) evaluasi prototipe, dan (5) implementasi final prototipe [8]. Metode *prototyping* lebih cocok digunakan dalam pembuatan perangkat lunak yang bersifat *customize* (sesuai dengan kebutuhan pengguna) dibandingkan dengan metode *waterfall* [15]. Tahapan model *prototyping* dapat dilihat pada Gambar 1 [16].



Gambar 1. Model *Prototyping*

Tahapan metode *prototyping* dalam penelitian ini dilakukan dalam tiga iterasi pengujian *dashboard* dan perangkat IoT menggunakan konsep yang sama untuk mendapatkan hasil sesuai dengan kebutuhan seperti terlihat pada Gambar 2. Tahapan evaluasi prototipe dilakukan dengan uji coba pada pengguna yang dilakukan dengan tiga iterasi. Iterasi pertama dilakukan dengan pengujian perangkat IoT dan sensor, iterasi kedua dilakukan dengan pengujian *dashboard* dan iterasi ketiga dilakukan dengan pengujian *blackbox testing* sehingga menghasilkan prototipe final yang sesuai dengan kebutuhan pengguna.



Gambar 2. Tahapan penelitian

2.1. Analisis Kebutuhan

Analisis kebutuhan dilakukan melalui observasi langsung pada kegiatan budidaya sawi pagoda secara *indoor* dan wawancara mendalam dengan lima praktisi hidroponik. Dari hasil analisis diperoleh kebutuhan fungsional sistem berupa: (a) pemantauan *real-time* parameter pH, TDS/EC, suhu air, CO₂, dan tVOC; (b) penyimpanan historis data sensori; (c) dua mode operasi yakni Manual dan Auto dengan *rule engine*; (d) kontrol aktuator berupa pompa pH Up/Down, pompa nutrisi A/B, pompa sirkulasi, dan *grow light*; serta (e) notifikasi otomatis saat parameter di luar rentang *setpoint*.

2.2. Perancangan Prototipe

2.2.1. Perancangan Arsitektur Sistem IoT

Sistem SHINS dirancang menggunakan arsitektur IoT empat lapis yang *loosely coupled* sehingga setiap lapis dapat ditingkatkan secara independen [17]. Keempat lapis tersebut adalah:

(1) *Sensing Layer*: perangkat keras di area tanam mencakup ESP32 DevKit, sensor pH, TDS/EC, DS18B20, DHT21, SGP30, modul *relay*, pompa peristaltik, pompa sirkulasi, dan *grow light LED full-spectrum*.

(2) *Network Layer*: ESP32 mengakuisisi data dari semua sensor, menormalisasi dan mengemas *payload* JSON, lalu mengirimkannya melalui Wi-Fi menggunakan protokol MQTT QoS 1 ke broker Mosquitto yang berjalan di *server*.

(3) *Processing Layer*: Layer ini melakukan validasi dan penyimpanan telemetri ke *database* Supabase, serta menjalankan *rule engine* untuk mode AUTO yang menjaga pH, TDS/EC, suhu, RH, CO₂, dan jadwal *grow light* tetap dalam rentang *setpoint*.

(4) *Application Layer*: *web dashboard* responsif menampilkan data *real-time*, grafik historis, editor *setpoint*, kontrol manual aktuator dan *log sensor*. *Dashboard* dibangun berbasis web dengan bahasa pemrograman *react.js* yang terhubung ke *Supabase Realtime* dan broker MQTT via WebSocket [18].

2.2.2. Rancangan Perangkat Keras

Tabel 1 menyajikan daftar komponen utama (*Bill of Materials*) sistem SHINS beserta spesifikasinya. Mikrokontroler utama adalah ESP32-WROOM-32U yang dipilih karena memiliki Wi-Fi terintegrasi, dua inti prosesor, dan jumlah GPIO yang cukup untuk mengakomodasi semua sensor dan aktuator [19].

Tabel 1: Komponen IoT Sistem SHINS

Komponen	Spesifikasi / Tipe
ESP32 DevKit	ESP32-WROOM-32U
Sensor pH	pH Meter Pro V2 Kit
Sensor TDS/EC	EC Transmitter TDS 0-2000 ppm
Sensor Suhu Air	DS18B20 (1-Wire)
Sensor Suhu & RH	DHT21 AM2301
Sensor CO ₂ & tVOC	SGP30 (I2C)
Modul <i>Relay</i>	Relay 4-Channel 5V
Pompa Peristaltik	Pompa 24V 3x5mm (x3)

Tabel 2 menyajikan pemetaan pin antara komponen sensor/aktuator dengan pin GPIO ESP32.

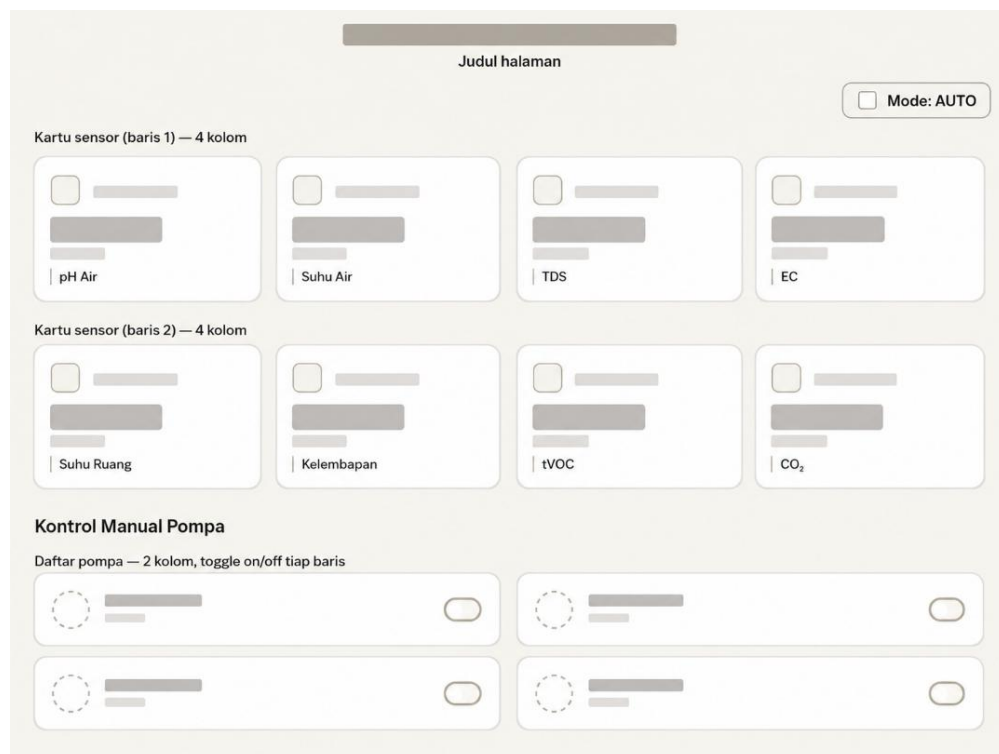
Tabel 2: Pemetaan Pin Sensor dan Aktuator pada ESP32

No.	Komponen	Pin ESP32	Protokol
1	Sensor pH	GPIO 13	ADC
2	Sensor TDS/EC	GPIO 16, 17	UART
3	Sensor Suhu Air	GPIO 13	1-Wire
4	Sensor Suhu & RH	GPIO 4	Single-Wire
5	Sensor CO ₂ /tVOC	GPIO 21, 22	I2C
6	Relay 4-Channel	GPIO 14, 25, 26, 27	GPIO

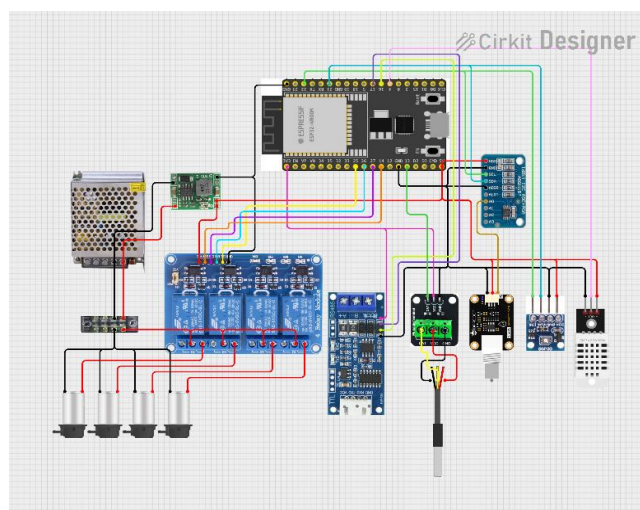
2.2.3 Perancangan Mockup Aplikasi

Firmware ESP32 ditulis menggunakan Arduino IDE dengan *library* PubSubClient untuk komunikasi MQTT, *library* OneWire dan DallasTemperature untuk sensor DS18B20, *library*

DHT untuk sensor DHT21, serta *library* Adafruit SGP30 untuk sensor CO₂/tVOC [20]. ESP32 mengirimkan *payload* JSON ke topik MQTT setiap 5 detik berisi seluruh data telemetri terkini. Pada sisi server, broker Mosquitto dikonfigurasi pada port 1883 dengan autentikasi *username* dan *password*. *Database* Supabase (PostgreSQL) menyimpan empat tabel utama, yaitu *devices*, *telemetry*, *setpoints*, dan *actuators*. *Dashboard web* dikembangkan dengan react.js dan dikonfigurasi melalui variabel lingkungan untuk URL Supabase dan WebSocket MQTT yang dapat dilihat desain *wireframe* pada Gambar 3 sehingga mampu menampilkan seluruh data sensor dan sesuai dengan kebutuhan pengguna [21]. Integrasi antara ESP32 dan beberapa sensor yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 3. Mockup Wireframe Dashboard Aplikasi



Gambar 4. Wiring Diagram

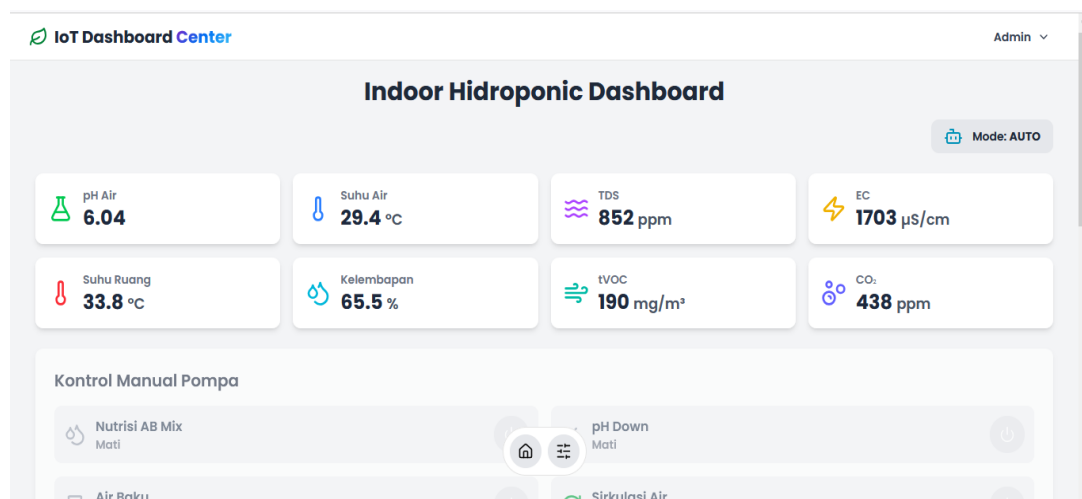
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Implementasi Perangkat Keras

Seluruh komponen perangkat keras berhasil diintegrasikan sesuai rancangan. ESP32 terhubung ke semua sensor dan *relay*, dicatu oleh PSU 24V/4,5A Omron S8FS-C10024. Semua komponen elektronik ditempatkan dalam boks panel listrik IP65 yang dilengkapi kipas ventilasi. Hasil pengujian konektivitas Wi-Fi menunjukkan ESP32 berhasil terhubung ke broker MQTT dengan latensi rata-rata 45 ms dan tingkat keberhasilan pengiriman pesan 99,7% selama pengujian 72 jam.

3.2 Tampilan *Dashboard Web*

Dashboard web berhasil dikembangkan dengan tampilan yang responsif yang dapat dilihat pada Gambar 5. Halaman utama menampilkan enam kartu indikator *real-time* untuk pH, TDS/EC, suhu air, suhu ruang, RH, dan CO₂, masing-masing dilengkapi indikator warna (hijau = normal, kuning = peringatan, merah = kritis). Panel grafik historis menampilkan tren data dalam rentang waktu yang dapat dikustomisasi hingga 30 hari.



Gambar 5. Tampilan *Dashboard Web* Sistem SHINS

3.2.1 Mode Operasi

Sistem SHINS mendukung dua mode operasi. Pada mode Manual, pengguna dapat menyalakan dan mematikan secara langsung setiap aktuator (pompa pH Up, pompa pH Down, pompa nutrisi A, pompa nutrisi B, pompa sirkulasi, kipas, dan *grow light*) melalui tombol pada *dashboard*. Pada mode Auto, *rule engine* pada *service ingester* secara otomatis menjaga parameter dalam rentang *setpoint*: dosing pH Up/Down jika pH di luar target, dosing nutrisi A/B jika TDS/EC di luar target, kontrol sirkulasi berdasarkan suhu air, kontrol kipas/ventilasi berdasarkan RH dan CO₂, serta jadwal fotoperiode *grow light*.

3.2.2 Kalibrasi Sensor

Kalibrasi sensor pH dilakukan dengan metode dua titik menggunakan larutan *buffer* pH 7,00 untuk menentukan *offset* dan larutan *buffer* pH 4,00 atau 10,00 untuk

menentukan *slope*. Kalibrasi sensor TDS/EC menggunakan larutan standar 1413 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Hasil kalibrasi disimpan di *log* kalibrasi pada *dashboard*.

3.3 Pengujian Sistem

Pengujian sistem dilakukan melalui dua metode. Pertama, pengujian akurasi sensor dilakukan dengan membandingkan pembacaan sensor sistem terhadap alat ukur referensi selama 72 jam dengan interval 5 menit, menghasilkan 864 titik data per sensor. Kedua, pengujian *black box* dilakukan terhadap seluruh fitur *dashboard* untuk memverifikasi fungsionalitas dari perspektif pengguna akhir.

3.4 Setpoint Awal Kalibrasi Sensor

Setpoint awal sistem dikalibrasi khusus untuk budidaya sawi pagoda secara *indoor*. Nilai *setpoint* yang diterapkan berdasarkan referensi agronomis dan hasil observasi lapangan disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3: *Setpoint* Parameter Operasional Sistem SHINS untuk Sawi Pagoda

Parameter	Setpoint	Satuan	Keterangan
pH	6,90	pH	pH optimal untuk sawi pagoda
TDS/EC	943	ppm	Konsentrasi nutrisi A/B Mix
Suhu Air	27,2	°C	Suhu larutan nutrisi
Suhu Ruang	29	°C	Suhu udara ruangan
Kelembapan	76,8	%RH	Kelembaban relatif udara
CO ₂	400	ppm	Konsentrasi karbon dioksida
Grow Light	14–16	jam/hari	Fotoperiode harian

3.5 Hasil Pengujian Akurasi Sensor

Pengujian akurasi sensor dilakukan selama 72 jam dengan 864 titik data per sensor. Hasil perbandingan terhadap alat ukur referensi tersertifikasi disajikan pada Tabel 4 dengan perhitungan sebagai berikut:

$$\text{Akurasi} = 1 - \left(\frac{\text{Rata-rata Error}}{\text{Nilai Setpoint}} \right) \times 100\%$$

Tabel 4: Hasil Pengujian Akurasi Sensor Sistem SHINS

Sensor	Setpoint	Rata-rata Error	Akurasi
pH	6,90 pH	0,10 pH	98,5%
TDS/EC	943 ppm	1,20 ppm	99,87%
Suhu Air	27,2 °C	0,20 °C	99,26%
Suhu Ruang	29 °C	0,30 °C	98,97%
Kelembaban RH	76,8 %	1,50 %	98,05%
CO ₂	400 ppm	12 ppm	97,00%

Berdasarkan Tabel 4, seluruh sensor menunjukkan tingkat akurasi sensor rata-rata sebesar 97%, yang dinilai sangat baik untuk aplikasi *smart farming*. Sensor pH mencapai akurasi 98,5% berkat kalibrasi dua titik yang presisi. Sensor SGP30 untuk CO₂ memiliki akurasi relatif lebih rendah (97,0%) dibandingkan sensor lain, yang merupakan karakteristik umum

sensor gas elektrokimia di kelas harganya, namun masih dalam batas toleransi yang dapat diterima [22].

3.6 Hasil Pengujian *Black Box*

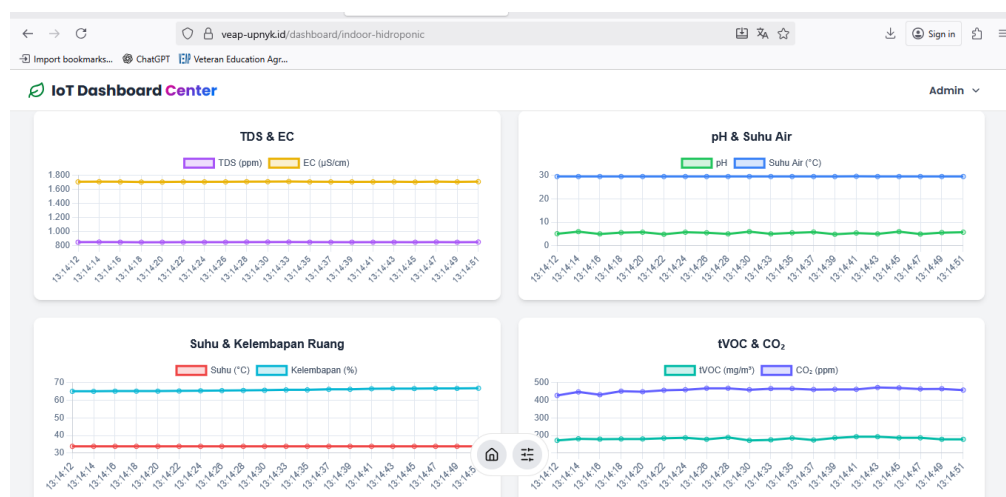
Pengujian *black box* dilakukan terhadap tujuh fitur utama sistem SHINS. Hasil pengujian disajikan pada Tabel 5. Seluruh fitur berhasil berfungsi sesuai ekspektasi dengan *delay* rata-rata pembaruan data *dashboard* sebesar 1,3 detik, yang sangat memadai untuk kebutuhan pemantauan pertanian *real-time*.

Tabel 5: Hasil Pengujian *Black Box* Dashboard SHINS

Fitur yang Diuji	Hasil yang Diharapkan	Status
Tampilan telemetri real-time	Data diperbarui setiap 5 detik	Berhasil
Grafik historis	Data hingga 30 hari, filter waktu	Berhasil
Switch mode Manual/Auto	Perubahan mode tersimpan & aktif	Berhasil
Editor setpoint	Setpoint tersimpan ke Supabase	Berhasil
Kontrol pompa pH Up/Down	Relay aktif sesuai perintah dashboard	Berhasil
Kontrol nutrisi A/B	Relay aktif sesuai perintah dashboard	Berhasil
Auto dosing pH (rule engine)	Dosing otomatis saat pH di luar rentang	Berhasil

3.7 Evaluasi Metode Prototyping

Penerapan metode *prototyping* dalam tiga kali pengujian *dashboard* dan perangkat IoT terbukti efektif menghasilkan sistem yang sesuai kebutuhan pengguna. Pada pengujian pertama, pengguna memberikan masukan tentang perlunya indikator status *online/offline* perangkat secara *real-time*. Pengujian kedua menghasilkan penambahan fitur *log* kalibrasi dan wizard kalibrasi pH/EC yang lebih intuitif. Pengujian ketiga menambahkan fitur grafik *overlay multi-parameter* dan ekspor data CSV atas permintaan pengguna seperti yang terlihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Fitur grafik overlay multi-parameter

Pengujian dilakukan sebanyak tiga pengujian, respons positif pengguna pada setiap iterasi mengonfirmasi bahwa pendekatan *prototyping* yang responsif terhadap masukan lapangan menghasilkan sistem yang *applicable*.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil merancang dan mengimplementasikan sistem SHINS atau *Smart Hidroponics* dalam Ruangan berbasis IoT menggunakan metode *prototyping* untuk budidaya sawi pagoda dalam ruangan. Kesimpulan yang dapat adalah: (1) Arsitektur IoT 4-layer (*Sensing, Network, Processing, Application*) dengan ESP32, MQTT/Mosquitto, Supabase, dan *web dashboard* terbukti efektif sebagai platform monitoring dan kontrol hidroponik *indoor*. (2) Semua sensor mencapai akurasi 97%, dengan sensor pH mencapai 99,0%. (3) Mode *Auto* dengan *rule engine* berhasil menjaga parameter pH, TDS/EC, suhu, RH, CO₂, dan jadwal *grow light* sesuai *setpoint* sawi pagoda secara otonom. (4) Seluruh sembilan fitur *dashboard* berhasil divalidasi dengan *delay* pembaruan rata-rata 1,3 detik. (5) Metode *prototyping* menghasilkan sistem yang responsif terhadap kebutuhan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] FAO, "The Future of Food and Agriculture: Alternative Pathways to 2050," Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2018.
- [2] H. M. Resh, *Hydroponic Food Production: A Definitive Guidebook for the Advanced Home Gardener and the Commercial Hydroponic Grower*, 7th ed. Boca Raton: CRC Press, 2016.
- [3] N. Sharma, S. Acharya, K. Kumar, N. Singh, and O. P. Chaurasia, "Hydroponics as an advanced technique for vegetable production: An overview," *J. Soil Water Conserv.*, vol. 17, no. 4, pp. 364–371, 2018.
- [4] M. A. J. Hidayat and A. Z. Amrullah, "Sistem Kontrol dan Monitoring Tanaman Hidroponik Berbasis Internet of Things (IoT) Menggunakan NodeMCU ESP32," *J. Saintekom*, vol. 12, no. 1, pp. 23–32, 2022, doi: 10.33020/saintekom.v12i1.223.
- [5] R. Prahenusa and H. Hardyanto, "Penerapan Teknologi IoT pada Tanaman Hidroponik menggunakan Arduino dan Blynk Android," *J. Din. Inform.*, vol. 7, no. 2, pp. 1–10, 2018.
- [6] Y. Setiawan and H. Tanudjaja, "Penggunaan Internet of Things (IoT) untuk Pemantauan dan Pengendali Sistem Hidroponik," *TESLA*, vol. 20, no. 2, pp. 175–182, 2018.
- [7] A. Tzounis, N. Katsoulas, T. Bartzanas, and C. Kittas, "Internet of Things in agriculture, recent advances and future challenges," *Biosyst. Eng.*, vol. 164, pp. 31–48, 2017.
- [8] P. Sihombing et al., "Controllable IoT Based Open Source Platform for Smart Farming," in *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 648, p. 012020, 2019.
- [9] A. Rahimian, M. Abbasi, and A. Javaheri, "MQTT-Based IoT Architecture for Smart Greenhouse Monitoring," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 112230–112245, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3103540.
- [10] F. Wang, M. Fang, and H. Wu, "Design and Implementation of Remote Monitoring System for Hydroponic Plants Based on IoT," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1754, p. 012218, 2021.
- [11] R. Muhammad, Ridwan, Firmansyah, dan A. Syarif Aziz. "Sistem Kontrol Dan Monitoring Tanaman Hidroponi Berbasis Internet of Things (IoT)". *Jurnal Nasional Komputasi dan Teknologi Informasi*, Vol. 8 No. 1, 2025.

- [12] L. Adi Supriyono. "Sistem Monitoring Suhu, Kelembaban dan Kandungan Nutrisi Budidaya Tanaman Sawi Caisim Hidroponik Berbasis IoT". Jurnal Ilmiah Teknik Mesin, Elektro dan Komputer Vol 3 No.1, 2023.
- [13] A. Junaidi, "Internet of Things, Sejarah, Teknologi dan Penerapannya: Review," J. Ilm. Teknol. Infomasi Terap., vol. 1, no. 3, pp. 62–66, 2015.
- [14] R. S. Pressman and B. R. Maxim, Software Engineering: A Practitioner's Approach, 9th ed. New York: McGraw-Hill Education, 2019.
- [15] A. Sihombing and R. Maulana, "Perbandingan model waterfall dan metode prototype untuk pengembangan aplikasi pada sistem informasi," *Jurnal Metadata*, vol. 5, no. 2, pp. 120-130, Juli 2023.
- [16] I. Sommerville, Software Engineering, 10th ed. Boston: Pearson, 2016.
- [17] Sensirion AG, "SGP30 Air Quality Sensor Evaluation Kit Datasheet," Stafa, Switzerland: Sensirion AG, 2020. [Online]. Available: <https://www.sensirion.com>
- [18] Eclipse Foundation, "Mosquitto MQTT Broker Documentation," 2024. [Online]. Available: <https://mosquitto.org/documentation/>
- [19] Espressif Systems, "ESP32 Technical Reference Manual," v5.2, Shanghai: Espressif Systems, 2023.
- [20] J. Gubbi, R. Buyya, S. Marusic, and M. Palaniswami, "Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions," *Future Gener. Comput. Syst.*, vol. 29, no. 7, pp. 1645–1660, 2013.
- [21] S. Few, Information Dashboard Design: The Effective Visual Communication of Data. Sebastopol: O'Reilly Media, 2006.
- [22] R. Prahenusa and H. Hardyanto, "Penerapan Teknologi IoT pada Tanaman Hidroponik menggunakan Arduino dan Blynk Android," *J. Din. Inform.*, vol. 7, no. 2, pp. 1–10, 2018.