

Sistem Monitoring Kelembapan Media Tanam dan Level Air Berbasis ESP32-MQTT

Rizki Misbah Hidayat^{1*}, Ahmad Agis Fadillah²

¹⁻²Teknik Elektro, Universitas Siliwangi, Indonesia

*Penulis Korespondensi: 247002111040@student.unsil.ac.id

Abstract. *This study discusses the design and testing of a growing media moisture and water level monitoring system based on ESP32-MQTT. The system was developed to support real-time monitoring of growing media conditions and water availability through a monitoring dashboard. This research used an experimental method with a design and implementation approach by developing an ESP32 circuit connected to a capacitive soil moisture sensor and a water level sensor, then sending sensor data to the dashboard through the MQTT protocol and Node-RED. Testing was carried out using a plant pot as the moisture testing medium and a water container as the water level testing medium. The results showed that the growing media moisture sensor displayed 0% in dry and very dry soil conditions, 61% in moist soil, and 89% in very moist soil. The water level sensor displayed 0 cm, 2.4 cm, and 4 cm according to the testing conditions. These results indicate that ESP32-MQTT can be used as an initial prototype for monitoring growing media moisture and water level before being applied to a complete hydroponic or aquaponic system.*

Keywords: ESP32-MQTT; Growing Media Moisture; Monitoring; Node-RED; Water Level.

Abstrak. Penelitian ini membahas perancangan dan pengujian sistem monitoring kelembapan media tanam dan level air berbasis ESP32-MQTT. Sistem ini dikembangkan untuk membantu pemantauan kondisi media tanam dan ketersediaan air secara real-time melalui dashboard monitoring. Penelitian menggunakan metode eksperimen dengan pendekatan rancang bangun, yaitu merancang rangkaian ESP32 yang terhubung dengan *capacitive soil moisture sensor* dan *water level sensor*, kemudian mengirimkan data sensor ke dashboard melalui protokol MQTT dan Node-RED. Pengujian dilakukan pada pot tanaman biasa sebagai media uji kelembapan dan wadah air sebagai media uji level air. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sensor kelembapan media tanam mampu menampilkan nilai 0% pada kondisi tanah kering dan sangat kering, 61% pada tanah lembab, serta 89% pada tanah sangat lembab. Sensor level air mampu menampilkan nilai 0 cm, 2,4 cm, dan 4 cm sesuai kondisi pengujian. Sistem ini menunjukkan bahwa ESP32-MQTT dapat digunakan sebagai prototipe awal monitoring media tanam dan level air sebelum diterapkan pada sistem hidroponik atau aquaponics secara penuh.

Kata Kunci: ESP32-MQTT; Kelembapan Media Tanam; Level Air; Monitoring; Node-RED.

1. LATAR BELAKANG

Perkembangan *Internet of Things* (IoT) mendorong pemanfaatan sistem monitoring berbasis sensor untuk membantu pemantauan kondisi media tanam dan ketersediaan air secara *real-time*. Pada budidaya tanaman skala kecil maupun pengembangan sistem hidroponik/*aquaponics*, kelembapan media tanam dan level air menjadi parameter penting karena berhubungan langsung dengan ketersediaan air bagi akar tanaman. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa ESP32 dapat digunakan sebagai mikrokontroler pada sistem monitoring hidroponik dengan beberapa sensor dan data dapat ditampilkan melalui aplikasi IoT (Abu Sneineh & Shabaneh, 2023). Sistem irigasi pintar berbasis ESP32 juga telah digunakan untuk membaca soil moisture dan menampilkan data melalui *dashboard* digital (Pereira et al., 2023). Selain itu, protokol MQTT dinilai sesuai untuk sistem IoT karena mampu

mendukung komunikasi data yang ringan dan reliabel pada sistem hidroponik berbasis sensor (Nilam Andi Safitri & Ardy Seto Priambodo, 2023).

Meskipun penelitian terkait monitoring IoT telah banyak dilakukan, sebagian besar sistem masih berfokus pada penerapan hidroponik lengkap, kontrol irigasi otomatis, atau pemantauan banyak parameter sekaligus. Pada tahap awal pengembangan sistem, dibutuhkan prototipe monitoring yang lebih sederhana dan spesifik untuk membaca kelembapan media tanam dalam satuan persen serta level air dalam satuan sentimeter. Sensor kelembapan kapasitif perlu diuji karena pembacaannya dapat dipengaruhi jenis media dan kondisi air, sehingga evaluasi awal penting dilakukan sebelum sistem diterapkan pada instalasi yang lebih besar (Abdelmoneim et al., 2025). Penelitian ini menawarkan kebaruan berupa implementasi sistem monitoring sederhana berbasis ESP32-MQTT yang berfokus pada dua parameter, yaitu kelembapan media tanam dan level air, dengan percobaan awal pada pot tanaman dan air. Tujuan penelitian ini adalah merancang dan menguji sistem agar data sensor dapat terbaca serta tampil pada dashboard monitoring secara *real-time*.

2. KAJIAN TEORITIS

***Internet of Things* pada Sistem Monitoring**

Internet of Things (IoT) merupakan konsep penghubungan perangkat fisik seperti sensor, mikrokontroler, dan sistem komunikasi jaringan agar data dapat dikirim serta dipantau secara jarak jauh. Dalam bidang pertanian, IoT banyak digunakan untuk membantu pemantauan kondisi lingkungan, kelembapan tanah, kualitas air, serta parameter pendukung pertumbuhan tanaman. Penerapan IoT pada pertanian cerdas dinilai mampu meningkatkan efisiensi pemantauan karena data dapat dikumpulkan secara otomatis dan ditampilkan melalui sistem digital (Srivastava & Das, 2022). Kajian terbaru juga menunjukkan bahwa IoT berperan penting dalam pengembangan pertanian berkelanjutan karena mampu mendukung proses monitoring, pengambilan keputusan, dan efisiensi penggunaan sumber daya (Kumar et al., 2024).

ESP32 sebagai Mikrokontroler Sistem

ESP32 merupakan mikrokontroler yang banyak digunakan dalam sistem IoT karena memiliki konektivitas Wi-Fi, kemampuan membaca sensor analog maupun digital, serta dapat diprogram untuk mengirim data ke server atau dashboard. Pada sistem monitoring berbasis sensor, ESP32 berfungsi sebagai pusat pemrosesan data yang membaca nilai dari sensor, mengolah data, kemudian mengirimkannya melalui jaringan internet. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa ESP32 dapat digunakan dalam sistem monitoring hidroponik untuk

membaca beberapa parameter dan menampilkan hasilnya melalui platform IoT (Abu Sneineh & Shabaneh, 2023). Selain itu, ESP32 juga banyak digunakan pada sistem irigasi pintar karena mampu membaca sensor kelembapan dan mengirim data untuk kebutuhan pemantauan tanaman (Pereira et al., 2023).

Sensor Kelembapan Media Tanam dan Sensor Level Air

Kelembapan media tanam merupakan parameter penting karena berkaitan langsung dengan ketersediaan air bagi akar tanaman. Sensor *capacitive soil* moisture bekerja dengan mendeteksi perubahan sifat dielektrik media sehingga lebih tahan terhadap korosi dibandingkan sensor resistif. Namun, sensor jenis ini tetap memerlukan pengujian awal karena hasil pembacaannya dapat dipengaruhi oleh jenis media, kondisi air, dan karakteristik sensor. Penelitian Abdelmoneim et al., (2025) menunjukkan bahwa sensor kelembapan kapasitif berbiaya rendah perlu dikalibrasi dan diuji konsistensinya sebelum digunakan pada sistem monitoring IoT. Selain kelembapan media, level air juga menjadi parameter penting untuk mengetahui ketersediaan air pada sistem, terutama ketika sistem akan dikembangkan ke arah hidroponik atau aquaponics (Alselek et al.,2022).

MQTT dan Dashboard Monitoring

MQTT merupakan protokol komunikasi IoT yang menggunakan mekanisme publish-subscribe. Dalam sistem ini, perangkat seperti ESP32 dapat mengirim data sensor ke topik tertentu, kemudian data tersebut diterima dan ditampilkan pada dashboard. MQTT banyak digunakan pada sistem monitoring karena ringan, sederhana, dan cocok untuk perangkat dengan sumber daya terbatas. Penelitian (Bayılmış et al.,2022) menjelaskan bahwa MQTT merupakan salah satu protokol komunikasi yang banyak digunakan pada sistem IoT karena efisien untuk pengiriman data sensor. Pada konteks hidroponik, Safitri dan Priambodo (2023) menunjukkan bahwa MQTT dapat digunakan untuk komunikasi data pada sistem tanaman berbasis IoT karena mampu mendukung pengiriman data secara efisien dan reliabel.

Penelitian Terdahulu dan Posisi Penelitian

Beberapa penelitian sebelumnya telah mengembangkan sistem monitoring berbasis IoT untuk hidroponik, irigasi pintar, dan aquaponics. Abu Sneineh dan Shabaneh (2023) merancang sistem monitoring hidroponik menggunakan ESP32 dan IoT, sedangkan Pereira et al. (2023) mengembangkan sistem irigasi pintar berbasis ESP32. Penelitian lain juga membahas penggunaan sensor kelembapan kapasitif serta pentingnya kalibrasi sensor agar pembacaan data lebih akurat (Abdelmoneim et al., 2025). Berdasarkan penelitian tersebut, penelitian ini memiliki posisi sebagai prototipe monitoring sederhana yang lebih spesifik pada dua parameter utama, yaitu kelembapan media tanam dalam satuan persen dan level air dalam satuan

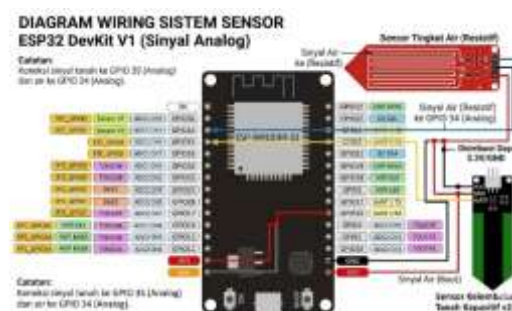
sentimeter. Sistem ini belum difokuskan pada kontrol otomatis, tetapi pada keberhasilan pembacaan sensor dan pengiriman data ke dashboard melalui ESP32-MQTT.

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen dengan pendekatan rancang bangun untuk merancang dan menguji sistem monitoring kelembapan media tanam dan level air berbasis ESP32-MQTT. Pendekatan eksperimen digunakan karena penelitian ini berfokus pada pengujian langsung terhadap prototipe untuk melihat apakah sensor dapat membaca data dan mengirimkannya ke dashboard secara real-time. Menurut Creswell dan Creswell (2018), penelitian eksperimen digunakan untuk menguji pengaruh atau kinerja suatu perlakuan terhadap objek tertentu melalui proses pengamatan dan pengukuran.

Objek penelitian ini adalah prototipe sistem monitoring yang terdiri atas ESP32, *capacitive soil* moisture sensor, dan water level sensor. Sampel pengujian dilakukan pada pot tanaman biasa sebagai media uji kelembapan dan wadah air sebagai media uji level air. Instrumen yang digunakan meliputi perangkat keras berupa ESP32, sensor kelembapan kapasitif, sensor level air, kabel jumper, kabel USB, serta perangkat lunak berupa Arduino IDE, MQTT, dan dashboard monitoring.

Teknik pengumpulan data dilakukan melalui pengujian fungsional sensor. Sensor kelembapan diuji dengan menancapkannya pada media tanam, sedangkan sensor level air diuji dengan mencelupkannya ke dalam air hingga nilai maksimum 4 cm. Data hasil pembacaan sensor kemudian dikirimkan oleh ESP32 melalui protokol MQTT menuju dashboard. Perancangan hubungan perangkat keras pada sistem ini ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Wiring rangkaian ESP32 dengan *capacitive soil* moisture sensor dan water level sensor.

Analisis data dilakukan secara deskriptif dengan mengamati keberhasilan pembacaan sensor, kesesuaian perubahan nilai pada dashboard, serta kestabilan pengiriman data. Sistem dinyatakan berhasil apabila data kelembapan media tanam dalam persen dan level air dalam sentimeter dapat tampil pada dashboard monitoring.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Implementasi Sistem Monitoring

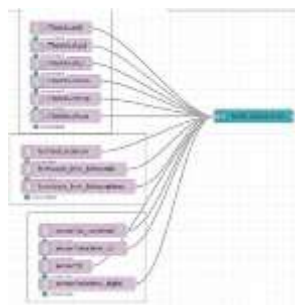
Sistem yang dikembangkan merupakan prototipe monitoring kelembapan media tanam dan level air berbasis ESP32-MQTT. Perangkat utama yang digunakan terdiri atas ESP32, *capacitive soil* moisture sensor, water level sensor, dan dashboard berbasis Node-RED. ESP32 berfungsi membaca data sensor, kemudian mengirimkan data melalui protokol MQTT agar dapat ditampilkan pada dashboard. Konsep ini sejalan dengan penelitian Abu Sneineh dan Shabaneh (2023), yang menunjukkan bahwa ESP32 dapat digunakan sebagai pusat pembacaan sensor dan pengiriman data pada sistem monitoring hidroponik berbasis IoT.

Rangkaian fisik sistem yang digunakan pada pengujian ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Rangkaian fisik ESP32 dengan *capacitive soil* moisture sensor dan water level sensor.

Selain perangkat keras, sistem juga dihubungkan dengan Node-RED sebagai media pengolahan dan tampilan data. Node-RED digunakan untuk menerima data dari MQTT dan menampilkannya dalam bentuk nilai kelembapan media tanam serta level air. Alur *flow* Node-RED yang digunakan dalam sistem ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Tampilan flow Node-RED untuk penerimaan data sensor melalui MQTT.

Penggunaan MQTT pada sistem ini dipilih karena protokol tersebut sesuai untuk komunikasi data sensor pada sistem IoT. Safitri dan Priambodo (2023) menyatakan bahwa

MQTT dapat memberikan komunikasi yang efisien dan reliabel pada sistem IoT, termasuk pada sistem tanaman hidroponik berbasis sensor.

Hasil Pengujian Water Level Sensor

Pengujian water level sensor dilakukan untuk mengetahui kemampuan sensor dalam membaca ketinggian air dan menampilkan hasilnya pada dashboard. Sensor diuji dalam tiga kondisi, yaitu tidak dicelupkan ke air, dicelupkan hingga 2,4 cm, dan dicelupkan hingga 4 cm. Dokumentasi pengujian water level sensor ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Pengujian water level sensor pada media air.

Hasil pembacaan water level sensor pada dashboard ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Tampilan dashboard hasil pembacaan water level sensor.

Hasil pengujian water level sensor secara ringkas disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil pengujian water level sensor.

No.	Kondisi Pengujian	Nilai Aktual	Nilai pada Dashboard	Keterangan
1	Sensor tidak dicelupkan ke air	0 cm	0 cm	Terbaca sesuai
2	Sensor dicelupkan ke air	2,4 cm	2,4 cm	Terbaca sesuai
3	Sensor dicelupkan ke air	4 cm	4 cm	Terbaca sesuai

Berdasarkan Tabel 1, water level sensor mampu membaca perubahan level air sesuai dengan kondisi pengujian. Ketika sensor tidak terkena air, nilai yang tampil pada dashboard adalah 0 cm. Ketika sensor dicelupkan pada ketinggian 2,4 cm dan 4 cm, nilai yang tampil pada dashboard juga menunjukkan 2,4 cm dan 4 cm. Hasil ini menunjukkan bahwa sistem dapat menampilkan data level air dalam satuan sentimeter dengan respons yang sesuai terhadap perubahan kondisi sensor. Temuan ini mendukung konsep monitoring air berbasis IoT yang menempatkan sensor level air sebagai parameter penting untuk memantau ketersediaan air pada sistem tanaman atau hidroponik. Penelitian Abu Sneineh dan Shabaneh (2023) juga menggunakan sensor level air sebagai salah satu parameter penting pada sistem monitoring hidroponik berbasis ESP32.

Hasil Pengujian *Capacitive soil Moisture Sensor*

Pengujian *capacitive soil moisture sensor* dilakukan untuk mengetahui kemampuan sensor dalam membaca kondisi kelembapan media tanam. Pengujian dilakukan pada pot tanaman biasa karena instalasi hidroponik belum tersedia pada tahap penelitian ini. Sensor diuji pada empat kondisi, yaitu tanah kering, tanah sangat kering, tanah lembab, dan tanah sangat lembab. Dokumentasi pengujian sensor pada media tanam ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Pengujian *capacitive soil moisture sensor* pada pot tanaman.

Hasil pembacaan kelembapan media tanam pada dashboard ditunjukkan pada Gambar

7.



Gambar 7. Tampilan dashboard hasil pembacaan *capacitive soil moisture sensor*.

Hasil pengujian *capacitive soil* moisture sensor secara ringkas disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil pengujian *capacitive soil* moisture sensor.

No.	Kondisi Media Tanam	Nilai pada Dashboard	Keterangan
1	Tanah kering	0%	Terbaca sebagai kondisi kering
2	Tanah sangat kering	0%	Terbaca sebagai kondisi sangat kering
3	Tanah lembab	61%	Terbaca sebagai kondisi lembab
4	Tanah sangat lembab	89%	Terbaca sebagai kondisi sangat lembab

Berdasarkan Tabel 2, sensor mampu menunjukkan perbedaan nilai antara kondisi media kering dan lembab. Pada tanah kering dan sangat kering, nilai yang tampil pada dashboard adalah 0%. Sementara itu, pada tanah lembab nilai yang tampil adalah 61%, dan pada tanah sangat lembab nilai meningkat menjadi 89%. Perubahan nilai ini menunjukkan bahwa sensor dapat merespons perbedaan kadar air pada media tanam. Hasil tersebut sesuai dengan prinsip kerja sensor kelembapan kapasitif yang mendeteksi perubahan karakteristik media akibat perubahan kadar air. Abdelmoneim et al. (2025) menjelaskan bahwa sensor kelembapan kapasitif berbiaya rendah dapat digunakan untuk sistem monitoring kelembapan tanah berbasis IoT, tetapi tetap memerlukan pengujian atau kalibrasi agar pembacaannya lebih konsisten.

Namun, hasil 0% pada dua kondisi kering menunjukkan bahwa sistem masih membaca kondisi kering dan sangat kering dalam kategori yang sama. Hal ini dapat terjadi karena batas bawah konversi nilai sensor pada program atau dashboard belum membedakan variasi kecil pada media yang sangat kering. Oleh karena itu, pengujian lanjutan dengan lebih banyak variasi kelembapan dan proses kalibrasi diperlukan agar sistem dapat membedakan kondisi media secara lebih detail. Penelitian lain mengenai sensor kelembapan kapasitif juga menunjukkan bahwa kalibrasi dapat meningkatkan akurasi pembacaan sensor pada berbagai kondisi tanah dan media.

Integrasi Data ke Dashboard Monitoring

Integrasi data ke dashboard dilakukan untuk memastikan bahwa data hasil pembacaan sensor dapat diterima dan ditampilkan secara real-time. Pada dashboard, data *capacitive soil* moisture ditampilkan dalam satuan persen, sedangkan data water level ditampilkan dalam satuan sentimeter dengan nilai maksimum 4 cm. Tampilan dashboard monitoring terintegrasi ditunjukkan pada Gambar 8.



Gambar 8. Tampilan dashboard monitoring data kelembapan media tanam dan level air.

Berdasarkan hasil pengujian, data dari kedua sensor berhasil ditampilkan pada dashboard. Hal ini menunjukkan bahwa ESP32 berhasil menjalankan fungsi sebagai perangkat pembaca sensor dan pengirim data, sedangkan MQTT berfungsi sebagai jalur komunikasi antara perangkat dan dashboard. Sistem seperti ini sesuai dengan konsep smart monitoring, yaitu perangkat sensor membaca kondisi lingkungan, kemudian data dikirimkan ke sistem visualisasi untuk membantu pengguna melakukan pemantauan. Pereira et al. (2023) juga menunjukkan bahwa ESP32 dapat digunakan pada sistem irigasi pintar untuk membaca sensor kelembapan dan menampilkan data melalui aplikasi atau dashboard IoT.

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa sistem yang dirancang telah memenuhi fungsi dasar sebagai prototipe monitoring kelembapan media tanam dan level air. Walaupun pengujian masih dilakukan pada pot tanaman biasa dan wadah air, hasil pengujian membuktikan bahwa sensor dapat membaca kondisi media, data dapat dikirimkan melalui MQTT, dan nilai dapat ditampilkan pada dashboard. Dengan demikian, sistem ini dapat menjadi tahap awal sebelum diterapkan pada instalasi hidroponik atau aquaponics yang lebih lengkap.

Pembahasan Keterbatasan Sistem

Sistem yang dikembangkan masih memiliki beberapa keterbatasan. Pertama, pengujian belum dilakukan pada instalasi hidroponik sebenarnya, sehingga hasil yang diperoleh masih merepresentasikan uji awal pada pot tanaman dan wadah air. Kedua, pengujian kelembapan media tanam masih terbatas pada empat kondisi, sehingga belum cukup untuk menyimpulkan akurasi sensor secara menyeluruh. Ketiga, sistem belum membahas kendali otomatis, karena fokus penelitian hanya pada monitoring nilai kelembapan media tanam dan level air.

Walaupun demikian, hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem ESP32-MQTT yang dibuat telah bekerja sesuai tujuan awal, yaitu membaca data sensor dan menampilkannya pada dashboard monitoring. Implikasi terapan dari penelitian ini adalah sistem dapat dikembangkan

sebagai bagian dari sistem hidroponik atau aquaponics yang lebih besar, khususnya untuk memantau ketersediaan air dan kelembapan media tanam sebelum dilakukan integrasi dengan aktuator seperti pompa air.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil perancangan dan pengujian, sistem monitoring kelembapan media tanam dan level air berbasis ESP32-MQTT berhasil membaca data dari *capacitive soil moisture* sensor dan water level sensor, kemudian menampilkannya pada dashboard monitoring. Sensor kelembapan mampu menunjukkan perbedaan kondisi media tanam, yaitu 0% pada tanah kering dan sangat kering, 61% pada tanah lembab, serta 89% pada tanah sangat lembab. Sensor level air juga mampu menampilkan nilai 0 cm, 2,4 cm, dan 4 cm sesuai kondisi pengujian. Hasil ini menunjukkan bahwa sistem telah memenuhi fungsi dasar sebagai prototipe monitoring.

Namun, penelitian ini masih terbatas pada pengujian di pot tanaman dan wadah air, belum pada instalasi hidroponik sebenarnya. Penelitian selanjutnya disarankan melakukan pengujian pada sistem hidroponik atau aquaponics secara langsung, menambah jumlah sampel pengujian, melakukan kalibrasi sensor, serta mengembangkan integrasi dengan aktuator seperti pompa air agar sistem dapat mendukung monitoring dan kendali otomatis.

DAFTAR REFERENSI

- Abdelmoneim, A. A., Al Kalaany, C. M., Khadra, R., Derardja, B., & Dragonetti, G. (2025). Calibration of low-cost capacitive soil moisture sensors for irrigation management applications. *Sensors*, 25(2), 343. <https://doi.org/10.3390/s25020343>
- Abu Sneineh, A., & Shabaneh, A. A. A. (2023). Design of a smart hydroponics monitoring system using an ESP32 microcontroller and the Internet of Things. *MethodsX*, 11, 102401. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2023.102401>
- Abu Sneineh, A., & Shabaneh, A. A. A. (2023). Design of a smart hydroponics monitoring system using an ESP32 microcontroller and the Internet of Things. *MethodsX*, 11, 102401. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2023.102401>
- Alreshidi, E. (2019). Smart sustainable agriculture (SSA) solution underpinned by Internet of Things (IoT) and artificial intelligence (AI). *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/1906.03106>
- Alselek, M., Alcaraz-Calero, J. M., Segura-Garcia, J., & Wang, Q. (2022). Water IoT monitoring system for aquaponics health and fishery applications. *Sensors*, 22(19), 7679. <https://doi.org/10.3390/s22197679>
- Ayon, M. F. I., Nahar, S., Rahman, A., Arif, M. T., Hasib, A., & Akib, A. S. M. A. (2026). An IoT-enabled smart aquarium system for real-time water quality monitoring and automated feeding. *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/2601.08484>
- Bayılmış, C., Ebleme, M. A., Çavuşoğlu, Ü., Küçük, K., & Sevin, A. (2022). A survey on communication protocols and performance evaluations for Internet of Things. *Digital*

Communications and Networks, 8(6), 1094–1104.
<https://doi.org/10.1016/j.dcan.2022.03.013>

- Bayılmış, C., Ebleme, M. A., Çavuşoğlu, Ü., Küçük, K., & Sevin, A. (2022). A survey on communication protocols and performance evaluations for Internet of Things. *Digital Communications and Networks*, 8(6), 1094–1104.
<https://doi.org/10.1016/j.dcan.2022.03.013>
- Creswell, J. W., & Creswell, J. D. (2017). *Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches*. Sage Publications.
- Elijah, O., Rahman, T. A., Orikumhi, I., Leow, C. Y., & Hindia, M. N. (2018). An overview of Internet of Things (IoT) and data analytics in agriculture: Benefits and challenges. *IEEE Internet of Things Journal*, 5(5), 3758–3773.
<https://doi.org/10.1109/JIOT.2018.2844296>
- Gomes, R., Silva, P., & Andrade, L. (2025). Beyond prototypes: What is missing to fill the gaps in IoT-enabled hydroponics platforms. *Horticulturae*, 11(11), 1322.
<https://doi.org/10.3390/horticulturae11111322>
- Gubbi, J., Buyya, R., Marusic, S., & Palaniswami, M. (2013). Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. *Future Generation Computer Systems*, 29(7), 1645–1660. <https://doi.org/10.1016/j.future.2013.01.010>
- Hasib, A., & Akib, A. S. M. A. (2026). An IoT-based smart plant monitoring and irrigation system with real-time environmental sensing, automated alerts, and cloud analytics. *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/2601.15830>
- Hidayat, M. A. J., & Amrullah, A. Z. (2021). Sistem kontrol dan monitoring tanaman hidroponik berbasis Internet of Things (IoT) menggunakan NodeMCU ESP32. *Jurnal Saintekom*, 12(1). <https://doi.org/10.33020/saintekom.v12i1.223>
- Jawad, H. M., Nordin, R., Gharghan, S. K., Jawad, A. M., & Ismail, M. (2017). Energy-efficient wireless sensor networks for precision agriculture: A review. *Sensors*, 17(8), 1781. <https://doi.org/10.3390/s17081781>
- Kodali, R. K., Jain, V., Bose, S., & Boppana, L. (2016). IoT based smart greenhouse monitoring system using Raspberry Pi. In *2016 IEEE Region 10 Humanitarian Technology Conference (R10-HTC)* (pp. 1–6). <https://doi.org/10.1109/R10-HTC.2016.7906846>
- Kumar, V., Sharma, K. V., Kedam, N., Patel, A., Kate, T. R., & Rathnayake, U. (2024). A comprehensive review on smart and sustainable agriculture using IoT technologies. *Smart Agricultural Technology*, 8, 100487.
<https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100487>
- Maulana, N., & Hadi, N. T. (2025). Design and simulation of an IoT-based adaptive control system for urban hydroponic farming. *Informatik: Jurnal Ilmu Komputer*, 21(3). <https://doi.org/10.52958/iftk.v21i3.12815>
- Muhammad, W., Faridah, L., & Sutisna. (2024). Automated nutrient control and monitoring system for Internet of Things (IoT)-based hydroponic towers. *Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan*, 13(3S1). <https://doi.org/10.23960/jitet.v13i3S1.8101>
- Nilam Andi Safitri, & Priambodo, A. S. (2023). MQTT and CoAP communication protocol analysis in Internet of Things system for strawberry hydroponic plants. *Journal of*

Robotics, Automation, and Electronics Engineering, 1(1).
<https://doi.org/10.21831/jraee.v1i1.69>

- Pereira, G. P., Chaari, M. Z., & Daroge, F. (2023). IoT-enabled smart drip irrigation system using ESP32. *IoT*, 4(3), 221–243. <https://doi.org/10.3390/iot4030012>
- Rachmini, S. A., Rasyid, M. R., Insani, C. N., & Rabbani, A. (2025). Rancang bangun dan evaluasi sistem smart-ponik untuk monitoring dan otomatisasi tanaman hidroponik berbasis IoT dengan protokol MQTT. *Journal of Applied Computer Science and Technology*. <https://doi.org/10.52158/tpd2rq94>
- Ray, P. P. (2017). Internet of Things for smart agriculture: Technologies, practices and future direction. *Journal of Ambient Intelligence and Smart Environments*, 9(4), 395–420. <https://doi.org/10.3233/AIS-170440>
- Reyes, M., Santos, J., & Cruz, P. (2025). A low-cost and reliable IoT-based NFT hydroponics system using ESP32 and MING stack. *Engineering Proceedings*, 122(1), 3. <https://doi.org/10.3390/engproc2025122003>
- Sinha, R. S., Wei, Y., & Hwang, S. H. (2017). A survey on LPWA technology: LoRa and NB-IoT. *ICT Express*, 3(1), 14–21. <https://doi.org/10.1016/j.ict.2017.03.004>
- Srivastava, A., & Das, D. K. (2022). A comprehensive review on the application of Internet of Thing (IoT) in smart agriculture. *Wireless Personal Communications*, 122(2), 1807–1837. <https://doi.org/10.1007/s11277-021-08970-7>
- Taeatsoala, K., Daniels, C., Ramsunar, A. J., Bronkhorst, P., & Ezugwu, A. E. (2026). TinyML-enabled IoT for sustainable precision irrigation. *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/2601.13054>