

Perancangan dan Implementasi Sistem Smart Farming Berbasis IoT Menggunakan Sensor Soil Moisture dan DHT11

Lailatul Fitriyah^{1)*} , Zahrotun Naimah²⁾

¹⁾³⁾ Universitas Madura, Pamekasan, Indonesia

¹⁾lailatul123ascil@gmail.com, ²⁾nnajmiy@gmail.com,

Abstract

Penelitian ini membahas perancangan dan implementasi sistem smart farming berbasis Internet of Things (IoT) menggunakan sensor soil moisture dan DHT11 untuk meningkatkan efisiensi dalam pengelolaan penyiraman tanaman. Tujuan penelitian ini adalah mengembangkan sistem yang mampu melakukan monitoring kondisi lingkungan secara real-time serta mengontrol penyiraman tanaman secara otomatis berdasarkan tingkat kelembapan tanah. Metode yang digunakan meliputi perancangan perangkat keras berupa sensor dan mikrokontroler serta pengembangan perangkat lunak untuk monitoring berbasis IoT. Sistem yang dibangun mampu membaca kelembapan tanah, suhu, dan kelembapan udara, kemudian mengontrol pompa air secara otomatis sesuai kondisi yang terdeteksi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem dapat bekerja secara efektif dalam menjaga kondisi tanah tetap optimal dan mengurangi pemborosan air. Dengan demikian, sistem smart farming berbasis IoT ini dapat menjadi solusi dalam meningkatkan efisiensi dan produktivitas di bidang pertanian.

Keywords: *Smart farming, IoT, soil moisture, DHT11, penyiraman otomatis*

Article history: Received 5 April 20XX, first decision 22 April 20XX, accepted 22 August 20XX, available online 28 October 20XX

I. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi di era digital telah membawa perubahan signifikan dalam berbagai sektor, termasuk bidang pertanian. Salah satu inovasi yang berkembang adalah penerapan konsep smart farming berbasis Internet of Things (IoT), yang memungkinkan proses pemantauan dan pengendalian kondisi pertanian dilakukan secara otomatis dan real-time [1], [2]. Teknologi ini menjadi solusi dalam meningkatkan efisiensi serta produktivitas hasil pertanian.

Dalam praktiknya, sistem penyiraman tanaman masih banyak dilakukan secara manual sehingga sering terjadi ketidaksesuaian dalam pemberian air. Kelebihan maupun kekurangan air dapat berdampak negatif terhadap pertumbuhan tanaman. Selain itu, faktor suhu dan kelembapan udara juga menjadi parameter penting yang mempengaruhi kondisi tanaman dan perlu dipantau secara berkala [3][4].

Penggunaan sensor soil moisture memungkinkan pengukuran tingkat kelembapan tanah secara akurat, sedangkan sensor DHT11 digunakan untuk mengukur suhu dan kelembapan udara. Dengan mengintegrasikan sensor-sensor tersebut ke dalam sistem berbasis IoT, maka proses monitoring dan pengendalian penyiraman dapat dilakukan secara otomatis berdasarkan kondisi lingkungan yang terdeteksi [5][6].

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan sistem smart farming berbasis IoT yang mampu melakukan monitoring kondisi lingkungan serta mengontrol penyiraman tanaman secara otomatis [7][8]. Sistem ini diharapkan dapat membantu meningkatkan efisiensi penggunaan air serta mempermudah pengelolaan pertanian secara modern [9][10].

II. TINJAUAN PUSTAKA

Tinjauan pustaka ini membahas konsep dasar, teknologi pendukung, serta hasil penelitian terdahulu yang relevan dengan sistem smart farming berbasis Internet of Things (IoT), khususnya yang menggunakan sensor soil moisture dan DHT11 dalam sistem monitoring dan penyiraman otomatis [11][12].

A. Smart Farming Berbasis Internet of Things (IoT)

* Corresponding author

Smart farming merupakan penerapan teknologi modern dalam bidang pertanian dengan tujuan meningkatkan efisiensi, produktivitas, serta kualitas hasil pertanian[13]. Salah satu teknologi utama yang digunakan adalah Internet of Things (IoT), yaitu konsep di mana perangkat fisik seperti sensor, aktuator, dan mikrokontroler saling terhubung melalui jaringan internet untuk bertukar data secara real-time[14][15]. Dalam sistem smart farming, IoT memungkinkan petani untuk memantau kondisi lingkungan seperti kelembapan tanah, suhu, dan kelembapan udara tanpa harus berada langsung di lokasi[16][17]. Data yang diperoleh dari sensor akan dikirim ke server atau platform cloud dan dapat diakses melalui aplikasi berbasis web maupun mobil[18][19]. Selain itu, IoT juga memungkinkan sistem melakukan kontrol otomatis, seperti mengaktifkan pompa air saat tanah dalam kondisi kering[20]. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa penerapan IoT dalam pertanian mampu meningkatkan efisiensi penggunaan sumber daya, khususnya air, serta mengurangi ketergantungan terhadap tenaga kerja manual. Sistem ini juga mendukung konsep pertanian presisi (precision agriculture) yang berbasis data[21][22].

B. Sensor Soil Moisture dalam Sistem Irigasi Otomatis

Sensor soil moisture merupakan komponen penting dalam sistem smart farming yang berfungsi untuk mengukur tingkat kelembapan tanah. Sensor ini bekerja dengan mendeteksi kandungan air dalam tanah melalui perubahan resistansi atau kapasitansi. Data yang dihasilkan oleh sensor soil moisture digunakan sebagai parameter utama dalam menentukan kebutuhan penyiraman tanaman[23][24]. Jika nilai kelembapan tanah berada di bawah batas tertentu, sistem akan secara otomatis mengaktifkan pompa air. Sebaliknya, jika tanah sudah cukup lembap, maka sistem akan menghentikan penyiraman. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa penggunaan sensor soil moisture dalam sistem irigasi otomatis mampu mengurangi pemborosan air secara signifikan[25]. Selain itu, sistem ini juga dapat menjaga kondisi tanah tetap optimal sehingga mendukung pertumbuhan tanaman yang lebih baik[26][27].

C. Sensor DHT11 untuk Monitoring Lingkungan

Sensor DHT11 adalah sensor digital yang digunakan untuk mengukur suhu dan kelembapan udara. Sensor ini banyak digunakan dalam sistem IoT karena harganya yang relatif murah, mudah digunakan, dan cukup akurat untuk aplikasi skala kecil hingga menengah[28][29]. Dalam sistem smart farming, data suhu dan kelembapan udara sangat penting karena berpengaruh terhadap proses fotosintesis dan pertumbuhan tanaman[30]. Dengan menggunakan sensor DHT11, sistem dapat memantau kondisi lingkungan secara real-time dan memberikan informasi kepada pengguna[31][32].

Integrasi sensor DHT11 dengan sistem IoT memungkinkan data ditampilkan dalam bentuk grafik atau dashboard, sehingga memudahkan analisis kondisi lingkungan secara berkelanjutan[33][34]. Data ini juga dapat digunakan sebagai parameter tambahan dalam pengambilan keputusan sistem otomatis[35][36].

D. Sistem Irigasi Otomatis Berbasis IoT

Sistem irigasi otomatis berbasis IoT merupakan solusi untuk mengatasi permasalahan penyiraman tanaman yang tidak efisien[37][38]. Sistem ini bekerja dengan menggabungkan sensor, mikrokontroler, dan aktuator seperti pompa air atau katup otomatis. Mikrokontroler berfungsi sebagai pusat pengendali yang menerima data dari sensor, kemudian memproses data tersebut untuk menentukan aksi yang harus dilakukan. Jika kondisi tanah kering, maka sistem akan mengaktifkan pompa air[39][40]. Sebaliknya, jika tanah sudah cukup lembap, sistem akan menghentikan penyiraman[41][42].

Beberapa penelitian menunjukkan bahwa sistem irigasi otomatis berbasis IoT mampu meningkatkan efisiensi penggunaan air hingga 30–50% dibandingkan metode konvensional[43][44]. Selain itu, sistem ini juga dapat meningkatkan produktivitas tanaman karena kondisi tanah selalu terjaga dalam batas optimal[45][46].

E. Mikrokontroler dan Platform IoT

Mikrokontroler seperti Arduino atau ESP32 merupakan komponen utama dalam sistem smart farming[47][48]. Perangkat ini bertugas membaca data dari sensor, memproses data, serta mengontrol aktuator. ESP32 sering digunakan karena memiliki fitur WiFi yang memungkinkan koneksi langsung ke internet tanpa perangkat tambahan[49][50].

Platform IoT seperti Blynk, ThingSpeak, atau Firebase digunakan untuk menyimpan dan menampilkan data sensor secara real-time. Melalui platform ini, pengguna dapat memantau kondisi tanaman dari jarak jauh serta mengontrol sistem secara manual jika diperlukan.

Integrasi antara mikrokontroler dan platform IoT memungkinkan sistem bekerja secara otomatis dan fleksibel. Selain itu, data yang tersimpan juga dapat digunakan untuk analisis lebih lanjut dalam meningkatkan kinerja sistem.

F. Penelitian Terkait (State of The Art)

Beberapa penelitian sebelumnya telah mengembangkan sistem smart farming berbasis IoT dengan berbagai pendekatan. Penelitian pertama menunjukkan bahwa penggunaan sensor soil moisture dan DHT11 dalam sistem irigasi otomatis mampu meningkatkan efisiensi penyiraman serta menjaga kelembapan tanah dalam kondisi optimal. Penelitian lain mengintegrasikan sistem IoT dengan platform cloud untuk monitoring real-time, sehingga

pengguna dapat mengakses data kapan saja dan di mana saja. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa sistem mampu mengurangi penggunaan air secara signifikan dibandingkan metode manual.

Selain itu, terdapat penelitian yang menggabungkan teknologi IoT dengan algoritma cerdas seperti logika fuzzy untuk meningkatkan akurasi dalam pengambilan keputusan penyiraman. Namun, sebagian besar penelitian masih terbatas pada skala kecil dan belum banyak diterapkan secara luas di lapangan.

Berdasarkan penelitian-penelitian tersebut, dapat disimpulkan bahwa sistem smart farming berbasis IoT memiliki potensi besar dalam meningkatkan efisiensi dan produktivitas pertanian, namun masih diperlukan pengembangan lebih lanjut untuk implementasi yang lebih luas dan optimal.

G. Kesenjangan Penelitian (Research Gap)

Meskipun banyak penelitian telah dilakukan terkait smart farming berbasis IoT, masih terdapat beberapa kekurangan yang perlu dikembangkan.

Pertama, sebagian besar penelitian hanya berfokus pada monitoring tanpa integrasi sistem kontrol otomatis yang optimal. Kedua, penggunaan sensor masih terbatas pada satu parameter saja, sehingga belum memberikan gambaran kondisi lingkungan secara menyeluruh.

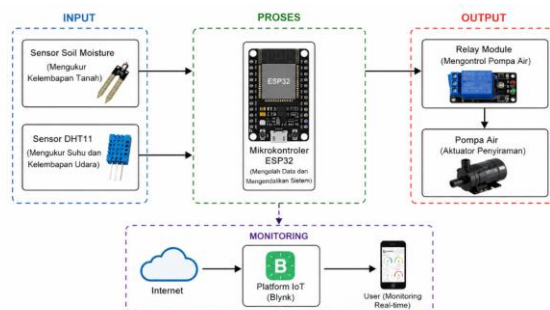
Ketiga, implementasi sistem masih banyak dilakukan pada skala prototype dan belum diuji dalam kondisi nyata secara berkelanjutan. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan sistem yang tidak hanya melakukan monitoring, tetapi juga kontrol otomatis berbasis data secara real-time dengan integrasi beberapa sensor.

III. METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode eksperimen yang di kombinasi kan dengan pendekatan rekayasa (engineering approach). Tujuan penelitian adalah merancang dan mengimplementasikan sistem smart farming berbasis Internet of Things (IoT) menggunakan sensor soil moisture dan DHT11 untuk memantau kondisi tanaman serta melakukan penyiraman otomatis sesuai kebutuhan. Tahapan penelitian meliputi perancangan sistem, implementasi, pengujian, dan analisis data.

A. Perancangan Sistem

Perancangan sistem dilakukan untuk memberikan gambaran umum mengenai cara kerja sistem yang akan dibangun. Sistem terdiri dari beberapa komponen utama yaitu sensor soil moisture, sensor DHT11, mikrokontroler ESP32, relay, pompa air, dan platform IoT (Blynk). Diagram blok sistem ditunjukkan pada Gambar1.

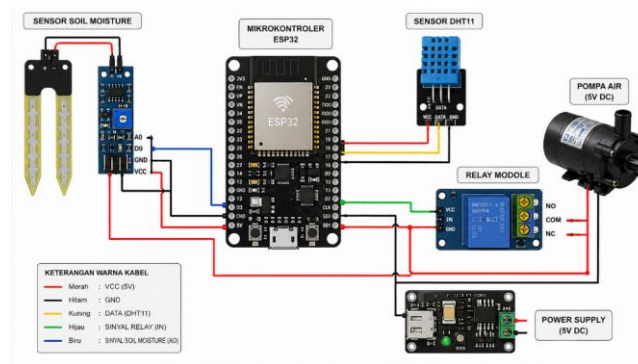


Gambar 1. Diagram Blok Sistem

Berdasarkan Gambar 1, sensor soil moisture dan DHT11 berfungsi sebagai input yang mengirimkan data ke mikrokontroler ESP32. Data tersebut diproses untuk menentukan kondisi tanaman. Jika kelembapan tanah berada di bawah batas yang ditentukan, maka relay akan mengaktifkan pompa air untuk melakukan penyiraman. Selain itu, data juga dikirimkan melalui internet ke platform IoT Blynk untuk monitoring secara real-time.

B. Perancangan Perangkat Keras

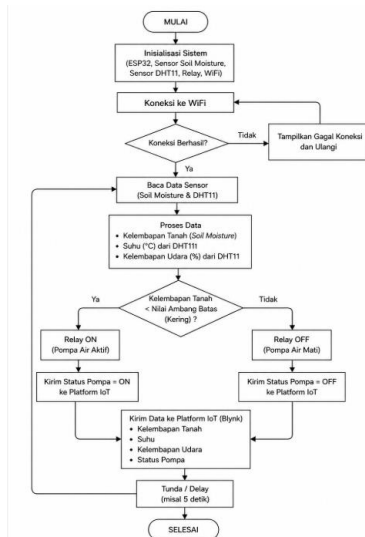
Perangkat keras dirancang untuk mendukung kinerja sistem sesuai dengan kebutuhan. Rangkaian sistem ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Rangkaian Perangkat Keras

C. Perancangan Perangkat Lunak

Perangkat lunak dibuat menggunakan Arduino IDE dengan bahasa pemrograman C/C++. Alur kerja program ditunjukkan pada diagram alir Gambar 3.



Gambar 3. Diagram Alir Perangkat Lunak

D. Teknik Pengumpulan Data

Data dikumpulkan dengan cara mengamati nilai kelembapan tanah, suhu, dan kelembapan udara yang terbaca oleh sensor, serta mencatat respon sistem terhadap kondisi tersebut. Pengambilan data dilakukan setiap 5 menit dan disimpan pada platform IoT Blynk.

E. Teknik Pengumpulan Data

Data dikumpulkan dengan cara mengamati nilai kelembapan tanah, suhu, dan kelembapan udara yang terbaca oleh sensor, serta mencatat respon sistem terhadap kondisi tersebut. Pengambilan data dilakukan setiap 5 menit dan disimpan pada platform IoT Blynk.

IV. HASIL

Hasil penelitian ini diperoleh dari proses implementasi dan pengujian sistem smart farming berbasis Internet of Things (IoT) menggunakan sensor soil moisture dan DHT11. Sistem yang dibangun terdiri dari sensor sebagai input, mikrokontroler ESP32 sebagai pengolah data, serta relay dan pompa air sebagai aktuator penyiraman otomatis. Berdasarkan hasil implementasi, seluruh komponen sistem dapat terintegrasi dengan baik. Sensor soil moisture mampu membaca tingkat kelembapan tanah dan mengirimkan data ke mikrokontroler secara real-time. Sensor DHT11 juga berhasil membaca suhu dan kelembapan udara di lingkungan sekitar tanaman. Pengujian sistem dilakukan dengan beberapa kondisi tanah, yaitu kering, lembap, dan basah. Pada kondisi tanah kering, sistem mendeteksi nilai kelembapan di bawah ambang batas yang telah ditentukan, sehingga mikrokontroler mengaktifkan relay dan pompa air menyala secara otomatis. Pada kondisi tanah lembap dan basah, sistem mendeteksi nilai kelembapan yang cukup sehingga pompa air tidak diaktifkan. Selain itu, sistem juga berhasil mengirimkan data sensor ke platform IoT secara real-time. Data yang ditampilkan meliputi kelembapan tanah, suhu, kelembapan udara, serta status pompa air. Pengguna dapat memantau kondisi tersebut melalui perangkat smartphone atau komputer.

Berikut merupakan hasil pengujian sistem berdasarkan kondisi tanah:

No	Kondisi Tanah	Nilai Kelembapan	Status Pompa
1	Kering	< 40%	ON
2	Lembap	40% – 70%	OFF
3	Basah	> 70%	OFF

Hasil tersebut menunjukkan bahwa sistem mampu bekerja sesuai dengan logika yang telah dirancang.

V. PEMBAHASAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah diperoleh, sistem smart farming berbasis IoT yang dikembangkan mampu menjalankan fungsi monitoring dan kontrol penyiraman secara otomatis dengan baik. Sensor soil moisture berperan penting dalam menentukan kondisi tanah, karena data yang dihasilkan menjadi dasar dalam pengambilan keputusan untuk mengaktifkan atau mematikan pompa air. Kinerja sistem menunjukkan bahwa penggunaan batas ambang kelembapan tanah cukup efektif dalam mengontrol penyiraman. Ketika nilai kelembapan berada di bawah ambang batas, sistem langsung merespons dengan mengaktifkan pompa air. Hal ini menunjukkan bahwa sistem memiliki respons yang cepat terhadap perubahan kondisi lingkungan. Integrasi dengan platform IoT juga memberikan nilai tambah pada sistem, karena memungkinkan pengguna untuk melakukan monitoring secara real-time dari jarak jauh. Data yang ditampilkan dapat membantu pengguna dalam memahami kondisi tanaman dan mengambil keputusan jika diperlukan. Dengan demikian, sistem ini tidak hanya berfungsi sebagai alat otomatis, tetapi juga sebagai alat bantu monitoring berbasis data. Dari sisi efisiensi, sistem ini mampu mengurangi penggunaan air dibandingkan metode manual, karena penyiraman hanya dilakukan saat diperlukan. Hal ini sejalan dengan konsep smart farming yang menekankan efisiensi sumber daya dan pengelolaan berbasis teknologi. Namun, terdapat beberapa keterbatasan dalam sistem ini. Sensor soil moisture memiliki tingkat akurasi yang dapat dipengaruhi oleh jenis tanah dan kondisi lingkungan. Selain itu, sensor DHT11 memiliki akurasi yang terbatas dibandingkan sensor yang lebih modern. Faktor lain yang mempengaruhi adalah kestabilan koneksi internet, karena sistem IoT sangat bergantung pada jaringan untuk proses monitoring. Secara keseluruhan, sistem yang dikembangkan telah mampu memenuhi tujuan penelitian, yaitu melakukan monitoring kondisi lingkungan dan mengontrol penyiraman tanaman secara otomatis. Sistem ini dapat menjadi solusi dalam meningkatkan efisiensi dan kemudahan dalam pengelolaan pertanian berbasis teknologi.

VI. KESIMPULAN

Berdasarkan proses perancangan, implementasi, serta pengujian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa sistem smart farming berbasis Internet of Things (IoT) dengan memanfaatkan sensor soil moisture dan DHT11 telah berhasil dikembangkan dan berfungsi sesuai dengan tujuan penelitian. Sistem ini mampu melakukan pemantauan kondisi lingkungan, meliputi kelembapan tanah, suhu, dan kelembapan udara secara real-time melalui platform IoT yang terhubung. Selain itu, sistem yang dirancang juga dapat menjalankan fungsi pengendalian penyiraman tanaman secara otomatis. Mekanisme ini bekerja berdasarkan nilai kelembapan tanah yang terdeteksi, di mana pompa air akan aktif ketika kondisi tanah berada di bawah batas yang ditentukan dan akan berhenti ketika kelembapan telah mencapai tingkat yang diinginkan. Hal tersebut menunjukkan bahwa sistem memiliki kemampuan respons yang baik terhadap perubahan kondisi lingkungan. Dari sisi efisiensi, penerapan sistem ini memberikan dampak positif dalam penghematan penggunaan air karena proses penyiraman dilakukan secara tepat sesuai kebutuhan tanaman. Di samping itu, kemudahan dalam melakukan pemantauan jarak jauh menjadi nilai tambah yang mendukung efektivitas pengelolaan pertanian berbasis teknologi. Namun demikian, masih terdapat beberapa keterbatasan yang perlu diperhatikan, seperti tingkat ketelitian sensor yang dapat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan serta ketergantungan sistem terhadap kestabilan jaringan internet. Oleh karena itu, pengembangan lebih lanjut sangat diperlukan untuk meningkatkan performa dan keandalan sistem secara keseluruhan.

Kontribusi Penulis: [Lailatul Fitriyah] berkontribusi pada perancangan konsep, implementasi sistem smart farming berbasis IoT, serta integrasi sensor Soil Moisture dan DHT11. [Zahrotun Naimah] berperan dalam pengumpulan data, analisis hasil pengujian sistem, evaluasi kinerja alat, serta penyusunan pembahasan penelitian.

Semua penulis telah membaca dan menyetujui versi naskah yang telah diterbitkan.

Pendanaan: -

Ucapan Terima Kasih: -

Konflik Kepentingan: Para penulis menyatakan tidak memiliki konflik kepentingan.

Ketersediaan Data: -

Persetujuan Berdasarkan Informasi: -

Pernyataan Dewan Peninjau Institusional: -

Subjek Hewan: -

ORCID:

First Author: -

Second Author: -

Third Author: -

REFERENCES

- [1] N. Meghanathan, "WITHDRAWN: Decay centrality-based distance vector similarity (DIVES) metric for complex networks," *J. King Saud Univ. - Comput. Inf. Sci.*, Jul. 2017, doi: 10.1016/j.jksuci.2017.06.007.
- [2] M. K. Ahmed and Z. K. Farej, "Survey on Clustering Techniques for Wireless Sensor Networks and Cluster Head Selection Model," *Eur. J. Comput. Sci. Inf. Technol.*, vol. 12, no. 2, pp. 1–21, Feb. 2024, doi: 10.37745/ejcsit.2013/vol12n2121.
- [3] J.-K. Lee, Y.-R. Choi, B.-K. Suh, S.-W. Jung, and K.-I. Kim, "A Survey on Energy Drainage Attacks and Countermeasures in Wireless Sensor Networks," *Appl. Sci.*, vol. 15, no. 4, p. 2213, Feb. 2025, doi: 10.3390/app15042213.
- [4] W. Wahyudi, A. I. Pradana, and H. Permatasari, "Implementasi Sistem Irigasi Otomatis Berbasis IoT untuk Pertanian Greenhouse," *J. Pendidik. dan Teknol. Indones.*, vol. 5, no. 2, Feb. 2025, doi: 10.52436/1.jpiti.656.

- [5] W. B. Heinzelman, A. P. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, "An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 1, no. 4, pp. 660–670, Oct. 2002, doi: 10.1109/TWC.2002.804190.
- [6] D. Guha Roy, B. Mahato, D. De, and S. N. Srirama, "Quality of experience aware recommendation system with IoT data filtration for handshaking among users using MQTT-SN protocol," *J. Ambient Intell. Humaniz. Comput.*, vol. 14, no. 7, pp. 8811–8826, Jul. 2023, doi: 10.1007/s12652-021-03644-5.
- [7] C. Del-Valle-Soto, A. Rodríguez, and C. R. Ascencio-Piña, "A survey of energy-efficient clustering routing protocols for wireless sensor networks based on metaheuristic approaches," *Artif. Intell. Rev.*, vol. 56, no. 9, pp. 9699–9770, Sep. 2023, doi: 10.1007/s10462-023-10402-w.
- [8] M. B. Yusuf, L. Rosyidi, and H. Saptono, "Implementasi Sistem IoT untuk Monitoring Konsumsi Energi Listrik di Rumah Pintar," *DBESTI J. Digit. Bus. Technol. Innov.*, vol. 2, no. 1, pp. 28–34, May 2025, doi: 10.54914/dbesti.v2i1.1354.
- [9] A. Oztoprak, R. Hassanpour, A. Ozkan, and K. Oztoprak, "Security Challenges, Mitigation Strategies, and Future Trends in Wireless Sensor Networks: A Review," *ACM Comput. Surv.*, vol. 57, no. 4, pp. 1–29, Apr. 2024, doi: 10.1145/3706583.
- [10] D. H. M. Anh, "Mesh Network Based on MQTT Broker for Smart Home and IIoT Factory," *ASEAN J. Sci. Eng.*, vol. 2, no. 2, pp. 173–180, Aug. 2021, doi: 10.17509/ajse.v2i2.39080.
- [11] M. B. Yusuf, L. Rosyidi, and H. Saptono, "Implementasi Sistem IoT untuk Monitoring Konsumsi Energi Listrik di Rumah Pintar," *DBESTI J. Digit. Bus. Technol. Innov.*, vol. 2, no. 1, pp. 28–34, May 2025, doi: 10.54914/dbesti.v2i1.1354.
- [12] B. Mishra and A. Kertesz, "The Use of MQTT in M2M and IoT Systems: A Survey," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 201071–201086, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3035849.
- [13] A. Juwaied and L. Jackowska-Strumillo, "Improving Performance of Cluster Heads Selection in DEC Protocol Using K-Means Algorithm for WSN," *Sensors*, vol. 24, no. 19, p. 6303, Sep. 2024, doi: 10.3390/s24196303.
- [14] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, "Wireless sensor networks: a survey," *Comput. Networks*, vol. 38, no. 4, pp. 393–422, Mar. 2002, doi: 10.1016/S1389-1286(01)00302-4.
- [15] J. Gubbi, R. Buyya, S. Marusic, and M. Palaniswami, "Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions," *Futur. Gener. Comput. Syst.*, vol. 29, no. 7, pp. 1645–1660, Sep. 2013, doi: 10.1016/j.future.2013.01.010.
- [16] I. Adumbabu and K. Selvakumar, "Energy Efficient Routing and Dynamic Cluster Head Selection Using Enhanced Optimization Algorithms for Wireless Sensor Networks," *Energies*, vol. 15, no. 21, p. 8016, Oct. 2022, doi: 10.3390/en15218016.
- [17] S. Wolfert, L. Ge, C. Verdouw, and M.-J. Bogaardt, "Big Data in Smart Farming: A Review," *Agric. Syst.*, vol. 153, pp. 69–80, 2017, doi: 10.1016/j.agry.2017.01.023.
- [18] K. G. Liakos, P. Busato, D. Moshou, S. Pearson, and D. Bochtis, "Machine Learning in Agriculture: A Review," *Sensors*, vol. 18, no. 8, p. 2674, 2018, doi: 10.3390/s18082674.
- [19] A. Kamilaris and F. X. Prenafeta-Boldú, "Deep Learning in Agriculture: A Survey," *Comput. Electron. Agric.*, vol. 147, pp. 70–90, 2018, doi: 10.1016/j.compag.2018.02.016.
- [20] M. Ayaz, M. Ammad-Uddin, Z. Sharif, A. Mansour, and E.-H. Aggoune, "Internet-of-Things (IoT)-Based Smart Agriculture: Toward Making the Fields Talk," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 129551–129583, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2931750.
- [21] G. C. Topp, J. L. Davis, and A. P. Annan, "Electromagnetic determination of soil water content," *Water Resour. Res.*, vol. 16, no. 3, pp. 574–582, 1980, doi: 10.1029/WR016i003p00574.
- [22] D. A. et al. Robinson, "Soil moisture measurement for ecological and hydrological watershed-scale observatories," *Vadose Zo. J.*, vol. 7, pp. 358–389, 2008, doi: 10.2136/vzj2007.0143.
- [23] H. et al. Vereecken, "On the spatio-temporal dynamics of soil moisture," *J. Hydrol.*, vol. 361, pp. 213–224, 2008, doi: 10.1016/j.jhydrol.2008.04.051.
- [24] W. et al. Dorigo, "ESA CCI Soil Moisture for improved Earth system understanding," *Remote Sens. Environ.*, vol. 203, pp. 185–215, 2017, doi: 10.1016/j.rse.2017.07.001.
- [25] H. et al. Bogaardt, "Potential of wireless sensor networks for measuring soil water content variability," *Vadose Zo. J.*, vol. 9, pp. 1002–1013, 2010, doi: 10.2136/vzj2009.0173.
- [26] I. Hari, E. Rahmarestya, and Harsono, "Development of IoT Based Smart Irrigation System with Programmable Logic Controller," *Int. J. Agric. Syst.*, 2021, doi: 10.20956/ijas.v9i1.2909.
- [27] S. Gupta and others, "Smart agriculture using IoT for automated irrigation, water and energy efficiency," *Agric. Technol.*, 2025, doi: 10.1016/j.atech.2025.101081.
- [28] X. Liu, Z. Zhao, and A. Rezaeipannah, "Intelligent and automatic irrigation system based on internet of things using fuzzy control technology," *Sci. Rep.*, 2025, doi: 10.1038/s41598-025-98137-2.
- [29] K. Novando and P. Noviyanti, "Implementation of IoT-Based Automatic Irrigation System Using Decision Tree Algorithm on Hydroponic Garden," *J. Comput. Inf. Eng. Technol.*, 2025, doi: 10.64472/jciet.v1i2.6.
- [30] P. K. Devan and others, "IoT based solar powered smart irrigation system," *J. Phys. Conf. Ser.*, 2021, doi: 10.1088/1742-6596/2054/1/012074.
- [31] A. P. Antony and others, "A review of practice and implementation of the Internet of Things (IoT) for smallholder agriculture," *Sustainability*, vol. 12, no. 9, p. 3750, 2020, doi: 10.3390/su12093750.
- [32] E. Navarro, N. Costa, and A. Pereira, "A systematic review of IoT solutions for smart farming," *Sensors*, vol. 20, no. 15, p. 4231, 2020, doi: 10.3390/s20154231.
- [33] J. Xu, B. Gu, and G. Tian, "Review of agricultural IoT technology," *Artif. Intell. Agric.*, 2022, doi: 10.1016/j.aiaa.2022.01.001.
- [34] M. Dhanaraju and others, "Smart Farming: Internet of Things (IoT)-Based Sustainable Agriculture," *Agriculture*, vol. 12, no. 10, p. 1745, 2022, doi: 10.3390/agriculture12101745.
- [35] M. E. H. Chowdhury and others, "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.
- [36] S. M. Hussein and others, "Distributed Key Management to Secure IoT Wireless Sensor Networks in Smart-Agro," *Sensors*, vol. 20, no. 8, p. 2242, 2020, doi: 10.3390/s20082242.
- [37] E. M. Pechlivani and others, "IoT-Based Agro-Toolbox for Soil Analysis and Environmental Monitoring," *Micromachines*, vol. 14, no. 9, p. 1698, 2023, doi: 10.3390/mi14091698.
- [38] N. S. Sayem and others, "IoT-based smart protection system to address agro-farm security challenges in Bangladesh," *Agric. Technol.*, 2023, doi: 10.1016/j.atech.2023.100358.
- [39] P. D. Gaspar and others, "Development of technological capabilities through IoT in agro-industry," *Appl. Sci.*, vol. 11, no. 8, p. 3454,

- 2021, doi: 10.3390/app11083454.
- [40] R. R. Shamshiri and others, "Research and development in agricultural robotics: A perspective of digital farming," *Int. J. Agric. Biol. Eng.*, vol. 11, no. 4, pp. 1–14, 2018, doi: 10.25165/j.ijabe.20181104.4278.
- [41] X. Li and Y. Zhao, "Smart irrigation system using machine learning and IoT," *Futur. Gener. Comput. Syst.*, vol. 112, pp. 108–119, 2020, doi: 10.1016/j.future.2020.05.017.
- [42] M. S. Mahmud and R. Buyya, "IoT-based smart irrigation monitoring and controlling system," *Internet of Things*, vol. 11, p. 100275, 2020, doi: 10.1016/j.iot.2020.100275.
- [43] M. S. Farooq, S. Riaz, and A. Abid, "A review on Internet of Things (IoT) for precision agriculture," *J. King Saud Univ. - Comput. Inf. Sci.*, vol. 34, no. 8, pp. 1–15, 2019, doi: 10.1016/j.jksuci.2019.10.014.
- [44] L. Zhang and H. Wang, "Deep learning-based smart irrigation system for sustainable agriculture," *Sustain. Comput. Informatics Syst.*, vol. 30, p. 100520, 2021, doi: 10.1016/j.suscom.2021.100520.
- [45] K. K. Patel and S. M. Patel, "Internet of Things-IOT: Definition, characteristics, architecture, enabling technologies, application & future challenges," *Int. J. Eng. Sci. Comput.*, vol. 6, no. 5, pp. 6122–6131, 2016, doi: 10.4010/2016.1482.
- [46] H. Navarro-Hellin and others, "A decision support system for managing irrigation in agriculture," *Comput. Electron. Agric.*, vol. 124, pp. 121–131, 2016, doi: 10.1016/j.compag.2016.04.003.
- [47] P. P. Ray, "Internet of Things for smart agriculture: Technologies, practices and future direction," *J. Ambient Intell. Smart Environ.*, vol. 9, no. 4, pp. 395–420, 2017, doi: 10.3233/AIS-170440.
- [48] C. Kamiński and others, "Smart water management platform: IoT-based precision irrigation for agriculture," *Sensors*, vol. 19, no. 2, p. 276, 2019, doi: 10.3390/s19020276.
- [49] T. Ojha, S. Misra, and N. S. Raghuwanshi, "Wireless sensor networks for agriculture: The state-of-the-art in practice and future challenges," *Comput. Electron. Agric.*, vol. 118, pp. 66–84, 2015, doi: 10.1016/j.compag.2015.08.011.
- [50] H. M. Jawad, R. Nordin, and S. K. Gharghan, "Energy-efficient wireless sensor networks for precision agriculture: A review," *Sensors*, vol. 17, no. 8, p. 1781, 2017, doi: 10.3390/s17081781.

Publisher’s Note: Publisher stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.