

RANCANG BANGUN DAN AKUISISI DATA SISTEM PEMBERIAN NUTRISI OTOMATIS PADA HIDROPONIK VERTICAL

Oki Saputra*, Guyup Mahardhian Dwi Putra, Gagassage Nanaluh De Side, Mawar Maulani
Program Studi Teknik Pertanian, Fakultas Teknologi Pangan dan Agroindustri

Universitas Mataram

Jl. Majapahit No.62, Mataram, Nusa Tenggara Barat. 83115

*Corresponding Author Email: oki.saputra@unram.ac.id

ABSTRAK.

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan dan menguji sistem otomatisasi pemberian nutrisi pada tanaman hidroponik vertikal menggunakan mikrokontroler ESP32 dan sensor Total Dissolved Solids (TDS) sebagai pengukur konsentrasi nutrisi dalam larutan. Sistem ini secara otomatis mengaktifkan pompa untuk menambahkan larutan AB mix ketika konsentrasi nutrisi terdeteksi di bawah 1000 part per million (PPM), dan pengaduk otomatis diaktifkan untuk memastikan homogenitas larutan. Setelah konsentrasi nutrisi mencapai 1000 PPM, pompa dan pengaduk akan dimatikan secara otomatis. Parameter yang diuji terdiri dari hasil uji kinerja dan kalibrasi sistem, pengujian akurasi sensor TDS dan respon aktuator dalam mengatur konsentrasi nutrisi secara otomatis. Data hasil uji kinerja menunjukkan bahwa sistem mampu mengelola nutrisi secara efisien, dengan pemantauan real-time yang presisi dan respons yang cepat terhadap perubahan kondisi. Kalibrasi sensor dan evaluasi performa aktuator memberikan gambaran yang jelas mengenai efektivitas sistem dalam mendukung pertumbuhan tanaman pada hidroponik vertikal.

Keyword: ESP32, sensor TDS, hidroponik vertikal, sistem nutrisi otomatis, pemantauan *real-time*.

1. PENDAHULUAN

Dengan meningkatnya populasi global yang diperkirakan mencapai 9,7 miliar pada tahun 2050, kebutuhan akan pangan yang cukup dan berkualitas tinggi menjadi tantangan yang mendesak di seluruh dunia ("The State of Food and Agriculture 2021," 2021). Dalam menghadapi tantangan ini, diperlukan metode pertanian yang tidak hanya dapat meningkatkan hasil produksi tetapi juga berkelanjutan dan ramah lingkungan. Salah satu pendekatan inovatif yang semakin mendapatkan perhatian adalah hidroponik, yang memungkinkan penanaman tanaman tanpa tanah dengan penggunaan air dan nutrisi yang lebih efisien dibandingkan dengan pertanian konvensional (Duanhpakdee et al., 2024; Hemathilake & Gunathilake, 2022; Kushawaha et al., 2024). Praktik ini sejalan dengan Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDGs), khususnya SDG 2 yang menekankan penghapusan kelaparan dan peningkatan ketahanan pangan melalui inovasi dalam teknik pertanian.

Pengelolaan nutrisi yang optimal dalam sistem hidroponik sangat penting untuk menjamin pertumbuhan tanaman yang sehat. Total Dissolved Solids (TDS) merupakan indikator kunci dalam mengukur konsentrasi nutrisi dalam larutan yang digunakan untuk pertumbuhan tanaman. Namun, pengaturan TDS secara manual seringkali tidak efisien dan berisiko tinggi terhadap kesalahan, yang dapat berakibat negatif terhadap hasil panen (Magwaza et al., 2020a; Rahman et al., 2024; Son et al., 2016). Penelitian menunjukkan bahwa fluktuasi dalam konsentrasi nutrisi dapat mengganggu proses metabolisme tanaman, yang pada gilirannya menurunkan

produktivitas dan kualitas hasil pertanian (Gholkar et al., 2022; Magwaza et al., 2020b). Masalah ini menjadi tantangan serius dalam mencapai SDGs, terutama dalam konteks pertanian yang berkelanjutan dan produktif. Oleh karena itu, perlu adanya pengembangan sistem otomatisasi yang dapat memantau dan mengatur pemberian nutrisi secara real-time. Dalam hal ini, penggunaan mikrokontroler seperti ESP32 dan sensor TDS menjadi solusi yang menjanjikan untuk meningkatkan efisiensi dan akurasi dalam pengelolaan nutrisi hidroponik. Sistem ini dirancang untuk secara otomatis mengaktifkan pompa nutrisi ketika konsentrasi TDS terdeteksi di bawah ambang batas tertentu dan memastikan homogenitas larutan melalui pengadukan otomatis. Inovasi ini tidak hanya mendukung penggunaan sumber daya yang lebih efisien tetapi juga berkontribusi pada SDG 12, yang menekankan pentingnya konsumsi dan produksi yang bertanggung jawab.

Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan menguji sistem otomatisasi pemberian nutrisi pada hidroponik vertikal dengan fokus pada kalibrasi sensor TDS dan evaluasi kinerja sistem. Dengan pemantauan dan pengaturan yang tepat, diharapkan sistem ini dapat memberikan pemahaman yang komprehensif tentang efektivitasnya dalam mendukung pertumbuhan tanaman. Selain itu, hasil penelitian diharapkan tidak hanya meningkatkan efisiensi sistem hidroponik tetapi juga memberikan kontribusi terhadap pengembangan teknologi pertanian yang berkelanjutan. Dengan demikian, penelitian ini berkontribusi pada pencapaian SDGs dalam konteks ketahanan pangan dan keberlanjutan lingkungan, serta mendorong adopsi inovasi pertanian yang lebih berkelanjutan di masa depan (Garg et al., 2024).

Studi Literatur

Otomatisasi pemberian nutrisi dalam sistem hidroponik sangat penting untuk mengoptimalkan pertumbuhan tanaman dan pengelolaan sumber daya. Tinjauan ini mengevaluasi kemajuan terbaru dalam sistem manajemen nutrisi otomatis untuk hidroponik vertikal, dengan penekanan pada metodologi, kinerja, dan keterbatasannya.

Dalam beberapa studi (Magwaza et al., 2020a; Shrivastava et al., 2023) menjelaskan pengembangan sistem pemberian nutrisi otomatis yang menggunakan mikrokontroler untuk mengelola konsentrasi nutrisi dalam sistem hidroponik. Penelitian ini menunjukkan peningkatan yang signifikan dalam laju pertumbuhan tanaman akibat pengendalian yang tepat terhadap pemberian nutrisi. Namun, sistem tersebut bergantung pada kalibrasi manual konsentrasi nutrisi, yang membatasi aplikabilitasnya dalam lingkungan pertanian yang dinamis.

Selanjutnya, beberapa studi lain (Abu Sneineh & Shabaneh, 2023; Fathidarehniyeh et al., 2023; Kumar et al., 2023) berfokus pada integrasi teknologi sensor dengan pompa otomatis untuk pemberian nutrisi dalam pengaturan hidroponik. Mereka melaporkan bahwa sistem ini memanfaatkan sensor pH dan konduktivitas listrik (EC) untuk terus memantau larutan nutrisi. Meskipun integrasi beberapa sensor meningkatkan respons sistem, kompleksitas kalibrasi dan pemeliharaan sensor menjadi tantangan, terutama di operasi skala kecil.

Penggunaan Total Dissolved Solids (TDS) sebagai ukuran untuk konsentrasi nutrisi dalam larutan hidroponik menawarkan beberapa keuntungan, terutama dalam menyederhanakan manajemen nutrisi. Meskipun TDS dapat memberikan

informasi yang berguna, ada keterbatasan ketika mengandalkan TDS sebagai satu-satunya alat untuk analisis nutrisi yang komprehensif, karena metode ini tidak mempertimbangkan ketersediaan nutrisi individual. Selain itu, analisis komparatif terhadap berbagai sistem pemberian nutrisi otomatis menunjukkan bahwa banyak sistem yang dirancang untuk meningkatkan efisiensi pemberian nutrisi sering kali bergantung pada sensor tertentu yang memerlukan proses kalibrasi dan validasi yang ekstensif. Hal ini menekankan perlunya pengembangan sistem yang dapat secara otomatis menyesuaikan level nutrisi tanpa memerlukan intervensi manual yang sering, sehingga mengungkapkan kesenjangan dalam fokus penelitian saat ini pada solusi yang sepenuhnya otomatis. Tinjauan ini menegaskan perlunya pengembangan sistem pemberian nutrisi otomatis yang tangguh untuk hidroponik vertikal yang mengintegrasikan pemantauan waktu nyata dan respons otomatis tanpa perlu intervensi manusia yang konstan. Penelitian mendatang harus berfokus pada pengembangan sistem yang menggabungkan pemantauan TDS dengan algoritma adaptif untuk meningkatkan efisiensi manajemen nutrisi sambil meminimalkan ketergantungan pada penyesuaian manual.

2. METODOLOGI

2.1 Bahan dan Alat

Alat dan bahan yang digunakan pada penelitian ini yaitu:

- a. *Hardware*: Mikrokontroler ESP32 S2, Sensor tekanan gas arduino, Sensor deteksi gas, *Pressure Gauge Digital*, Solenoid, LCD 128x64, Box casing, Baterai dan Laptop.
- b. *Software*: Fritzing, Arduino IDE dan Microsoft Office

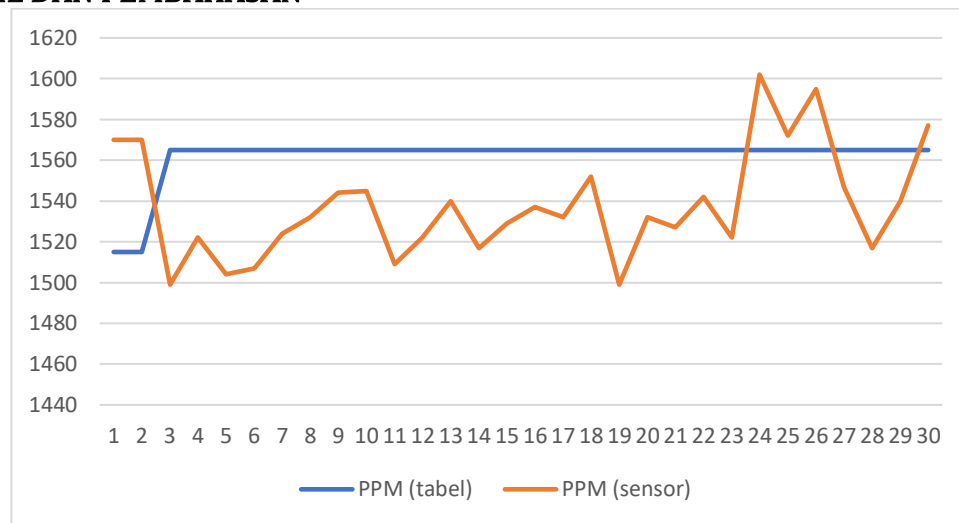
2.2 Prosedur Penelitian

Pada penelitian ini peneliti mengadopsi penerapan Model Waterfall untuk penelitian "Rancang Bangun Sistem Kontrol dan Monitoring Tekanan Gas pada Biodigester Berbasis IoT". Model Waterfall, dalam konteks ini, diadopsi sebagai pendekatan pengembangan yang linier dan terstruktur untuk memastikan tahapan pengembangan sistem yang akan dibuat dapat dijalankan secara metodis sesuai dengan kebutuhan dan spesifikasi yang telah ditentukan (Senarath, 2021).

2.3 Teknik Analisis Data

Analisis data dalam penelitian "Rancang Bangun Sistem Kontrol dan Monitoring Tekanan Gas pada Biodigester Berbasis IoT" menggunakan Analisis Statistik Deskriptif (Chiang, 2003), dengan tujuan untuk mendeskripsikan karakteristik dasar dari data (responsivitas sistem, ketepatan kontrol tekanan gas, dan hasil kalibrasi) yang diperoleh.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN



Gambar 1 Grafik uji konsistensi hasil kalibrasi sensor TDS

Berdasarkan Tabel 1, analisis data PPM pada suhu 30°C s/d 31°C terdapat beberapa perbedaan signifikan antara hasil yang diperoleh dari tabel referensi dan pengukuran sensor. Rata-rata PPM pada tabel adalah 1561,67, sementara rata-rata pada sensor sedikit lebih rendah, yakni 1537,57. Perbedaan kecil ini menunjukkan bahwa meskipun sensor mendekati hasil tabel, terdapat sedikit deviasi yang mungkin disebabkan oleh sensitivitas sensor atau kondisi lingkungan yang berubah-ubah. Selain itu, kesalahan standar pada sensor (4,87) lebih tinggi dibandingkan tabel (2,32), yang mengindikasikan bahwa hasil pengukuran sensor lebih bervariasi dibandingkan dengan nilai pada ppm tabel referensi.

Nilai median dan modus juga menunjukkan adanya variasi: median pada ppm tabel referensi adalah 1565, sementara sensor menunjukkan median 1532, baik di pagi maupun siang hari. Modus sensor juga lebih rendah pada nilai 1522, berbeda dengan tabel yang tetap pada 1565. Standar deviasi dan varians pada sensor juga lebih tinggi, dengan standar deviasi sensor sebesar 26,66 dibandingkan ppm tabel referensi yang hanya 12,69. Ini menunjukkan bahwa data sensor memiliki fluktuasi yang lebih besar, mungkin disebabkan oleh ketidakstabilan sensor atau sensitivitasnya terhadap perubahan kecil di lingkungan.

Kurtosis pada ppm tabel referensi mencapai 12,21, menunjukkan adanya nilai ekstrem yang lebih sering muncul, sedangkan kurtosis sensor lebih mendekati distribusi normal. Sementara itu, skewness pada tabel cenderung negatif (-3,66), yang berarti data tabel condong ke nilai yang lebih rendah, sedangkan skewness sensor positif (0,77), menunjukkan kecenderungan data sensor ke arah nilai yang lebih tinggi. Rentang pada sensor sebesar 103 juga lebih besar daripada tabel yang hanya 50, memperlihatkan bahwa sensor cenderung mencatat variasi nilai yang lebih luas dengan nilai minimum 1499 dan maksimum 1602.

Secara keseluruhan, meskipun sensor memberikan hasil yang mendekati ppm tabel referensi, variasi dan fluktuasi pada hasil sensor lebih besar dibandingkan ppm tabel referensi. Hal ini dapat diinterpretasikan bahwa sensor mungkin lebih sensitif terhadap perubahan lingkungan, atau memerlukan kalibrasi tambahan untuk menyelaraskan hasilnya dengan data referensi.

Tabel 1 Statistik Deskriptif

PPM (tabel)		PPM (sensor)		PPM (sensor)	
	1561,666		1537,666		1537,566
Mean	667	Mean	567	667	667
Standard	2,316027	Standard	4,866	2,316027	4,866891
Error	779	Error	891	779	036
Median	1565	Median	1532	1565	1532
Mode	1565	Mode	1522	1565	1522
Standard	12,68540	Standard	26,65	12,68540	26,65706
Deviation	659	Deviation	706	659	005
Sample	160,9195	Sample	710,5	160,9195	710,5988
Variance	402	Variance	989	402	506
	12,20663		0,193	12,20663	0,193665
Kurtosis	265	Kurtosis	665	265	325
	-		-		-
	3,659998		0,768	3,659998	0,768495
Skewness	686	Skewness	495	686	36
Range	50	Range	103	50	103
Minimum	1515	Minimum	1499	1515	1499
Maximum	1565	Maximum	1602	1565	1602
Sum	46850	Sum	46127	46850	46127
Count	30	Count	30	30	30

Tabel 2 Pengujian kinerja algoritma pemrograman aktuator

No.	PPM (Tanpa Air)	Kondisi Aktuator (Tanpa Air)	PPM (Cairan Kalibrasi)	Kondisi Aktuator (Cairan Kalibrasi)	PPM (Air Biasa)	Kondisi Aktuator (Air Biasa)	Keterangan
1	0	on	1626	off	927	on	Berhasil
2	0	on	1602	off	917	on	Berhasil
3	0	on	1599	off	890	on	Berhasil
4	0	on	1573	off	855	on	Berhasil
5	0	on	1567	off	737	on	Berhasil
6	0	on	1583	off	912	on	Berhasil
7	0	on	1599	off	860	on	Berhasil
8	0	on	1608	off	914	on	Berhasil
9	0	on	1651	off	944	on	Berhasil
10	0	on	1599	off	890	on	Berhasil

Berdasarkan Tabel 2 hasil pengukuran PPM dalam berbagai kondisi (tanpa air, dengan cairan kalibrasi, dan dengan air biasa) menunjukkan variasi yang signifikan dalam konsentrasi PPM dan kondisi aktuator. Pada kondisi tanpa air, semua nilai PPM adalah 0, dan aktuator berada dalam kondisi "on". Hal ini menunjukkan bahwa dalam kondisi kering atau tanpa cairan, tidak terdeteksi adanya konsentrasi partikulat, dan sistem aktuator tetap aktif. Namun, ketika menggunakan cairan kalibrasi, PPM menunjukkan nilai yang lebih tinggi, dengan kisaran antara 1573 hingga 1651. Dalam kondisi ini, aktuator berubah menjadi "off", yang menunjukkan bahwa sistem

mendeteksi adanya cairan dengan konsentrasi yang signifikan sehingga memicu respons aktuator untuk menonaktifkan aliran atau pengaturan tertentu. Hal ini bisa menjadi indikasi bahwa sistem mendeteksi cairan kalibrasi sebagai kondisi di mana tidak diperlukan intervensi lebih lanjut.

Selanjutnya, pada kondisi dengan air biasa, nilai PPM cenderung lebih rendah dibandingkan dengan cairan kalibrasi, yaitu berkisar antara 737 hingga 944, namun masih terdeteksi oleh sistem. Dalam kondisi ini, aktuator kembali ke kondisi "on". Respons ini menunjukkan bahwa meskipun air biasa memiliki beberapa kandungan yang terdeteksi oleh sensor, konsentrasinya tidak setinggi cairan kalibrasi, sehingga sistem menganggap perlu untuk mempertahankan aktuator dalam keadaan aktif.

Secara keseluruhan, respons sistem terhadap variasi jenis cairan ini menunjukkan bahwa aktuator dan sensor bekerja sesuai dengan perubahan konsentrasi PPM dalam cairan. Aktuator beralih ke kondisi "off" saat mendeteksi cairan kalibrasi dengan konsentrasi PPM tinggi, sedangkan untuk air biasa dan kondisi tanpa air, aktuator tetap "on". Pola ini dapat dimanfaatkan untuk memahami lebih lanjut tentang bagaimana sistem ini dapat beradaptasi dengan berbagai konsentrasi cairan serta pengaturan kondisi aktuator yang optimal.

Berdasarkan pengujian pada Tabel 2 yang dilakukan sebanyak 10 kali percobaan didapatkan hasil sempurna dengan 100% Tingkat keberhasilan dimana algoritma pemrograman berjalan sesuai rancangan.

Tabel 3 Pengujian konsistensi pompa ABmix

No	Volume Sebelum		Volume Setelah	
	A	B	A	B
1	20	20	10	10,5
2	20	20	10	10,4
3	20	20	10	10,6
4	20	20	10	10,5
5	20	20	10	10,6
6	20	20	10	10,7
7	20	20	10	10,7
8	20	20	10	10,5
9	20	20	10	10,6
10	20	20	10	10,8

Pengujian aktuator dilakukan untuk memastikan bahwa sistem dapat bekerja secara optimal dan responsif terhadap perintah dari mikrokontroler. Dalam pengujian ini, pompa AB mix dan motor pengaduk diuji untuk mengamati reaksinya ketika diberikan sinyal on/off berdasarkan algoritma kontrol yang telah dirancang. Setiap aktuator diaktifkan dan dinonaktifkan secara bergantian untuk mengevaluasi kemampuannya dalam mengikuti instruksi serta memastikan bahwa respons yang dihasilkan sesuai dengan spesifikasi yang ditetapkan.

Hasil pengujian menunjukkan volume sebelum dan sesudah pengoperasian aktuator. Volume cairan pada sampel A tetap stabil pada 20 ml, sedangkan setelah pengujian, volume pada sampel B menunjukkan peningkatan yang konsisten, berkisar antara 10,5 ml hingga 10,8 ml. Data ini mencerminkan efektivitas aktuator dalam mencampurkan atau memindahkan cairan dengan tepat. Peningkatan volume setelah pengujian menunjukkan bahwa aktuator berhasil mengalirkan atau mengaduk cairan

sesuai perintah, dan dapat diandalkan dalam beroperasi bersama sensor TDS untuk pengukuran yang lebih akurat.

Secara keseluruhan, hasil pengujian ini menunjukkan bahwa aktuator berfungsi dengan baik dan dapat diandalkan dalam sistem kontrol yang lebih besar, mendukung integrasi yang sukses antara pengukuran dan pengaturan dalam aplikasi yang melibatkan pengendalian kualitas air atau pengolahan cairan.

4. KESIMPULAN

Sistem otomatisasi yang dirancang menggunakan mikrokontroler ESP32 dan sensor TDS telah menunjukkan kinerja yang efektif dalam memantau dan mengatur konsentrasi nutrisi. Meskipun hasil pengukuran sensor TDS mendekati nilai referensi, terdapat variasi yang menunjukkan perlunya kalibrasi lebih lanjut untuk meningkatkan akurasi. Pengujian aktuator menunjukkan bahwa sistem dapat beroperasi dengan baik, dengan respons yang sesuai terhadap sinyal on/off, dan dapat mengatur aliran cairan dengan efisien.

Diperlukan pengujian tambahan untuk mengevaluasi stabilitas sensor dalam kondisi lingkungan yang beragam, serta memperbaiki proses kalibrasi agar hasil pengukuran lebih akurat. Selain itu, peningkatan algoritma kontrol untuk pengoperasian aktuator dapat meningkatkan efisiensi sistem secara keseluruhan, sehingga dapat diimplementasikan dengan lebih baik dalam aplikasi pertanian otomatisasi.

5. DAFTAR REFERENSI

1. 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. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2023.102401>
2. Duanhpakdee, K., Thananta, G., & Sukpancharoen, S. (2024). IoT Enhanced Deep Water Culture Hydroponic System for Optimizing Chinese Celery Yield and Economic Viability. *Smart Agricultural Technology*, 100545. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100545>
3. Fathidarehnijeh, E., Nadeem, M., Cheema, M., Thomas, R., Krishnapillai, M., & Galagedara, L. (2023). Current perspective on nutrient solution management strategies to improve the nutrient and water use efficiency in hydroponic systems. *Canadian Journal of Plant Science*, 104(2), 88–102. <https://doi.org/https://doi.org/10.1139/cjps-2023-0034>
4. Garg, K., Dhar, S., Kumar, S., Azman, E. A., Sharma, V. K., Meena, R. P., Hashim, M., Awasthi, M. K., Kumar, S., Onte, S., Kumar, D., Giri, B. S., & Rajawat, M. V. S. (2024). Enhancing agricultural output: Investigating the impact of advanced organic formulations on crop productivity, nutrient use efficiency, and profitability in a multi-crop system. *Journal of Environmental Management*, 366. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121759>
5. Gholkar, M., Thombare, P., Koli, U., & Kumbhar, N. (2022). Techno-economic assessment of agricultural land remediation measures through nutrient management practices to achieve sustainable agricultural production. *Environmental Challenges*, 7. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2022.100492>
6. Hemathilake, D. M. K. S., & Gunathilake, D. M. C. C. (2022). Chapter 32 - High-productive agricultural technologies to fulfill future food demands: Hydroponics, aquaponics, and precision/smart agriculture. In R. Bhat (Ed.), *Future Foods* (pp. 555–567). Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91001-9.00018-9>
7. Kumar, R., Rathore, S., Kundlas, K., Rattan, S., & Warghat, A. R. (2023). Chapter 8 - Vertical farming and organic farming integration: a review. In Sarathchandran, U. M.R., S. Thomas, & D. K. Meena (Eds.), *Organic Farming (Second Edition)* (pp. 291–315). Woodhead Publishing. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99145-2.00002-1>

8. Kushawaha, A., Shah, D., Vora, D., Zade, N., & Iyer, K. (2024). Urban small-scale hydroponics: A compact, smart home-based hydroponics system. *MethodsX*, 13. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2024.102998>
9. Magwaza, S. T., Magwaza, L. S., Odindo, A. O., & Mditshwa, A. (2020a). Hydroponic technology as decentralised system for domestic wastewater treatment and vegetable production in urban agriculture: A review. In *Science of the Total Environment* (Vol. 698). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134154>
10. Magwaza, S. T., Magwaza, L. S., Odindo, A. O., & Mditshwa, A. (2020b). Hydroponic technology as decentralised system for domestic wastewater treatment and vegetable production in urban agriculture: A review. In *Science of the Total Environment* (Vol. 698). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134154>
11. Rahman, M. A., Chakraborty, N. R., Sufiun, A., Banshal, S. K., & Tajnin, F. R. (2024). An AIoT-based hydroponic system for crop recommendation and nutrient parameter monitorization. *Smart Agricultural Technology*, 8. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100472>
12. Senarath, U. S. (2021). *Waterfall Methodology, Prototyping and Agile Development*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.17918.72001>
13. Shrivastava, A., Nayak, C. K., Dilip, R., Samal, S. R., Rout, S., & Ashfaq, S. M. (2023). Automatic robotic system design and development for vertical hydroponic farming using IoT and big data analysis. *Materials Today: Proceedings*, 80, 3546–3553. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.07.294>
14. Son, J. E., Kim, H. J., & Ahn, T. I. (2016). Chapter 17 - Hydroponic Systems. In T. Kozai, G. Niu, & M. Takagaki (Eds.), *Plant Factory* (pp. 213–221). Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801775-3.00017-2>
15. The State of Food and Agriculture 2021. (2021). In *The State of Food and Agriculture 2021*. FAO. <https://doi.org/10.4060/cb4476en>