

ระบบติดตามและตรวจวัดค่าความนำไฟฟ้าที่ชดเชยอุณหภูมิในสารละลายธาตุอาหารไฮโดรโปนิคส์

โดยใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตประสานสรรพสิ่ง

IoT-Based Monitoring System for Temperature-Compensated Electrical Conductivity

Measurement in Hydroponic Nutrient Solutions

จอมกษณ์ศักดิ์ เหมทานนท์¹ และ ลัญจกร นิลทรรัตน์²

¹สาขาวิชาวิศวกรรมโลจิสติกส์ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา

²สาขาวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศและไอโอที คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา

E-mail: Lanchakorn.ni@skru.ac.th^{*}

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอระบบติดตามและตรวจวัดค่าความนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity: EC) แบบเรียลไทม์ที่มีการชดเชยอุณหภูมิในสารละลายธาตุอาหารสำหรับระบบปลูกพืชไฮโดรโปนิคส์ โดยใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตประสานสรรพสิ่ง (Internet of Things: IoT) ระบบประกอบด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32-DevKitV1 ที่เชื่อมต่อกับเซ็นเซอร์วัดค่า EC และอุณหภูมิระดับอุตสาหกรรม พร้อมส่งข้อมูลไปยังแพลตฟอร์ม Blynk Legacy เพื่อการติดตามแบบออนไลน์ ผลการทดลองแสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงระหว่างอุณหภูมิและค่า EC โดยมีสัมประสิทธิ์ อุณหภูมิเท่ากับ 2.13%/°C อัลกอริทึมการชดเชยอุณหภูมิที่พัฒนาขึ้น สามารถลดความคลาดเคลื่อนในการวัดจาก ±8.5% เหลือเพียง ±0.3% ในช่วงอุณหภูมิ 20-35°C ระบบมีเสถียรภาพสูง โดยสามารถทำงาน ต่อเนื่องได้ 99.75% ตลอดระยะเวลา 30 วัน งานวิจัยนี้มีส่วนสนับสนุนการเกษตรแม่นยำโดยช่วยให้สามารถติดตามความเข้มข้นของธาตุอาหาร ได้อย่างแม่นยำ แม้จะมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในสภาพแวดล้อมภายในโรงเรือน

คำสำคัญ: ค่าความนำไฟฟ้า, การชดเชยอุณหภูมิ, ระบบไฮโดรโปนิคส์, ESP32, การติดตามด้วย IoT

Abstract

This paper presents an IoT-based monitoring system for real-time measurement and temperature compensation of electrical conductivity (EC) in hydroponic nutrient solutions. The system employs an ESP32-devkit v1 microcontroller integrated with industrial-grade EC and temperature sensors, connected to the blynk legacy platform for remote monitoring. Experimental results demonstrate a strong linear relationship between temperature and EC values, with a temperature coefficient of 2.13%/°C.

The implemented compensation algorithm reduces measurement error from ±8.5% to ±0.3% across the temperature range of 20-35°C. The system achieved 99.75% uptime over a continuous 30-day operation period, demonstrating high reliability for practical greenhouse applications. This work contributes to precision agriculture by enabling accurate nutrient monitoring despite temperature variations in greenhouse environments.

Keywords: Electrical conductivity, Temperature compensation, ESP32, Hydroponic system, IoT monitoring

1. บทนำ

การปลูกพืชด้วยระบบไฮโดรโปนิคส์ได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นอย่างมาก ในฐานะทางเลือกที่ยั่งยืนสำหรับการเกษตรสมัยใหม่ โดยเฉพาะในพื้นที่ ที่มีข้อจำกัดด้านพื้นที่เพาะปลูกและทรัพยากรน้ำ [1] ระบบนี้อาศัยการควบคุมคุณสมบัติของสารละลายธาตุอาหารอย่างแม่นยำ โดยค่าความนำไฟฟ้า (EC) ถือเป็นตัวบ่งชี้หลักของความเข้มข้นของธาตุอาหารในสารละลาย การรักษาระดับ EC ให้เหมาะสมมีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของพืช

อย่างไรก็ตาม การวัดค่า EC มีความสัมพันธ์โดยตรงกับอุณหภูมิ โดยค่าความนำไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นประมาณ 2% ต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ 1 องศาเซลเซียส [2] ในสภาพแวดล้อมภายในโรงเรือน อุณหภูมิของสารละลายธาตุอาหารสามารถเปลี่ยนแปลงได้อย่างมีนัยสำคัญ (15-35°C) เนื่องจากวงจรกลางวันกลางคืนและระบบควบคุมสภาพแวดล้อม การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิดังกล่าวทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการวัดค่า EC อย่างมาก หากไม่มีการชดเชยที่เหมาะสม ซึ่งอาจนำไปสู่การตัดสินใจที่ผิดพลาดในการจัดการธาตุอาหาร

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 18

18th Conference of Electrical Engineering Network 2026 (EENET 2026)



งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์: (1) พัฒนาระบบติดตามด้วย IoT โดยใช้ ESP32 สำหรับวัดค่า EC และอุณหภูมิแบบเรียลไทม์ (2) ศึกษาความสัมพันธ์ EC-อุณหภูมิในสารละลายไฮโดรโปนิกส์ และ (3) พัฒนาและทดสอบอัลกอริทึมชดเชยอุณหภูมิ

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อการวัดค่า EC

Hayashi [2] ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและค่าความนำไฟฟ้าในสารละลายน้ำ พบว่าค่า EC เพิ่มขึ้นประมาณ 2% ต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ 1°C โดยสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการ:

$$EC(T) = EC_{25} \times [1 + \alpha(T - 25)] \quad (1)$$

เมื่อ α คือสัมประสิทธิ์อุณหภูมิ (โดยทั่วไปอยู่ระหว่าง 0.019-0.022 สำหรับสารละลายไฮโดรโปนิกส์) และ EC_{25} คือค่าความนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิอ้างอิง 25°C

2.2 ระบบติดตามด้วย IoT

งานวิจัยก่อนหน้านี้ Tatas และคณะ [3] พัฒนาระบบ IoT สำหรับ ติดตามและควบคุม EC และ pH ในระบบไฮโดรโปนิกส์ Abu Sneineh และ Shabaneh [4] นำเสนอระบบที่ใช้ ESP32 เชื่อมต่อกับแพลตฟอร์ม Blynk เพื่อติดตาม TDS, pH และ EC แบบอัตโนมัติ Stevens และคณะ [5] พัฒนาระบบติดตามธาตุอาหารด้วย IoT spectroscopic sensor ทดสอบต่อเนื่อง 30 วัน และ Chen และคณะ [6] ใช้ fuzzy logic ควบคุม EC และ pH อัตโนมัติ อย่างไรก็ตาม ระบบที่รวมการชดเชย อุณหภูมิแม่นยำกับการติดตามผ่านคลาวด์ยังมีจำกัด งานวิจัยนี้จึงพัฒนาระบบสมบูรณ์ที่เชื่อมช่องว่างดังกล่าว

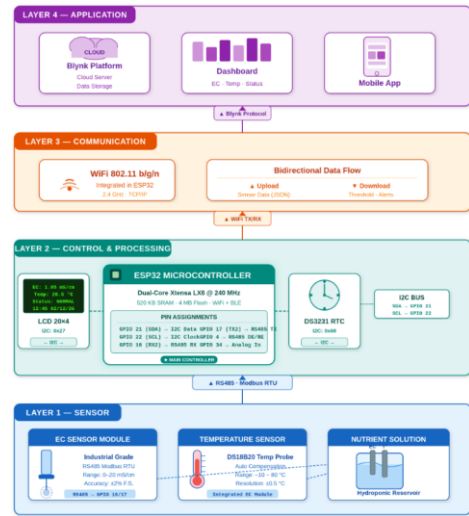
3. วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 สถาปัตยกรรมของระบบ

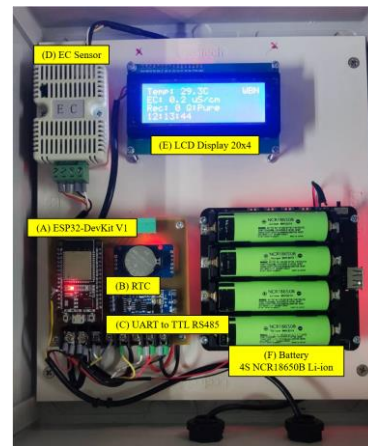
ระบบที่นำเสนอประกอบด้วย 4 ชั้นหลัก ได้แก่ (1) ชั้นเซ็นเซอร์ (2) การควบคุมและการประมวลผล (4) ชั้นการสื่อสาร และ (4) ชั้นแอปพลิเคชัน คลาวด์ ดังแสดงในรูปที่ 1

3.2 ฮาร์ดแวร์

ระบบประกอบด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32-DevKitV1 ที่มี CPU แบบ Dual-core 240 MHz พร้อมโมดูล WiFi 802.11n ในตัว เชื่อมต่อกับเซ็นเซอร์ EC ระดับอุตสาหกรรมแบบ RS485 Modbus RTU ที่สามารถวัดค่า 0-20 mS/cm ด้วยความแม่นยำ $\pm 2\%$ และมีเซ็นเซอร์อุณหภูมิ NTC 10K ($\pm 0.5^\circ\text{C}$) ในตัว ระบบติดตั้งโมดูล DS3231 RTC เพิ่มเติมเพื่อบันทึกเวลาและเป็นแหล่งอ้างอิงอุณหภูมิสำรอง จอแสดงผล LCD แบบ 1.3 นิ้ว ขนาด 20x4 ตัวอักษร ใช้แหล่งจ่ายไฟแบตเตอรี่สำรอง Li-ion 4S ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 1 สถาปัตยกรรมของระบบติดตามค่า EC และอุณหภูมิ



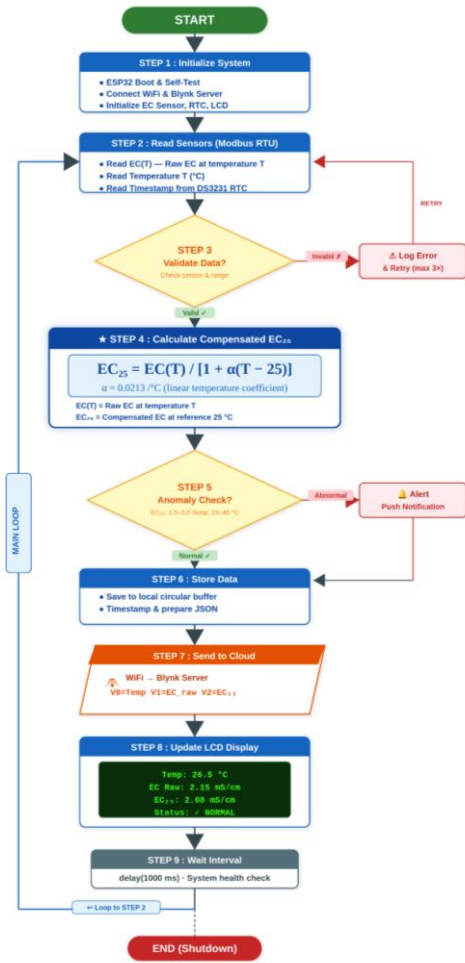
รูปที่ 2 ส่วนประกอบฮาร์ดแวร์ของระบบ

3.3 ซอฟต์แวร์และอัลกอริทึม

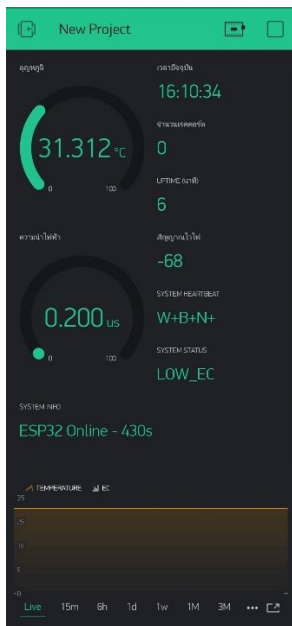
ซอฟต์แวร์ของระบบประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก (1) การอ่านค่าจากเซ็นเซอร์ ระบบอ่านค่า EC และอุณหภูมิผ่านโปรโตคอล Modbus RTU ด้วยความถี่ 1 Hz โดยใช้คำสั่ง Function Code 0x03 (Read Holding Registers) อ่านจาก Register 0x0000 สำหรับค่า EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$) และ Register 0x0001 สำหรับอุณหภูมิ ($^\circ\text{C} \times 10$) โปรโตคอล RS485 Modbus RTU มีความน่าเชื่อถือสูงและเหมาะสมสำหรับสภาพแวดล้อมอุตสาหกรรม (2) อัลกอริทึมการชดเชยอุณหภูมิ ระบบใช้อัลกอริทึมเชิงเส้นตรงในการชดเชยผลกระทบของอุณหภูมิต่อค่า EC ตามสมการ

$$EC_{25} = EC(T) / [1 + \alpha(T - 25)] \quad (2)$$

โดยที่ EC_{25} คือค่า EC ที่ชดเชยแล้วที่อุณหภูมิอ้างอิง 25°C, $EC(T)$ คือค่า EC ที่วัดได้ที่อุณหภูมิ T, α คือสัมประสิทธิ์อุณหภูมิ (0.0213/ $^\circ\text{C}$ จากการทดลอง) และ T คืออุณหภูมิที่วัดได้ ($^\circ\text{C}$) ขั้นตอนการทำงานของอัลกอริทึมแสดงใน Flowchart รูปที่ 3



รูปที่ 3 Flowchart ของอัลกอริทึมการชดเชยอุณหภูมิ



รูปที่ 4 หน้าจอ Dashboard บน Blynk แสดงการติดตามแบบเรียลไทม์

ส่วนที่ (3) ระบบส่งข้อมูลไปยัง Blynk Legacy Platform ผ่าน WiFi โดยใช้ Virtual Pins V0-V4 แสดงค่าอุณหภูมิ EC เวลาทำงาน และสถานะระบบตามลำดับ Dashboard ออกแบบให้แสดงผลด้วย Gauge Widget 2 ตัวสำหรับแสดงอุณหภูมิและค่า EC แบบเรียลไทม์ และ SuperChart Widget สำหรับแสดงกราฟแนวโน้มย้อนหลัง ผู้ใช้สามารถติดตามข้อมูลได้ทั้งผ่านมือถือ ระบบสามารถทำงานต่อเนื่องได้นานกว่า 7 วัน โดยมี uptime 99.7% ตามผลการทดสอบดังรูปที่ 4

3.4 การออกแบบการทดลอง

การทดลองใช้สารละลาย AB Mix (EC = 2.0 mS/cm @ 25°C) ทดสอบที่ 9 ระดับอุณหภูมิ (20-35°C) ด้วย water bath (±0.1°C) ทำซ้ำ 3 ครั้ง วัดค่า 10 ครั้ง/อุณหภูมิหลังสมดุล 15 นาที คำนวณ Absolute Error, Relative Error และ RMSE จากนั้นทดสอบระบบในโรงเรือน 30 วัน บันทึกทุก 1 นาที ติดตาม uptime connectivity และ error recovery

4. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและค่า EC

ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 1 และรูปที่ 5 พบว่าค่า EC มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับอุณหภูมิอย่างมีนัยสำคัญ (p < 0.001) โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ $R^2 = 0.9987$ การวิเคราะห์ด้วย linear regression ให้สมการ $EC(T) = 1.792 + 0.0382(T - 20)$ หรือเขียนในรูป temperature coefficient ได้ $\alpha = 0.0213/°C$ (2.13%/°C) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Hayashi [2]

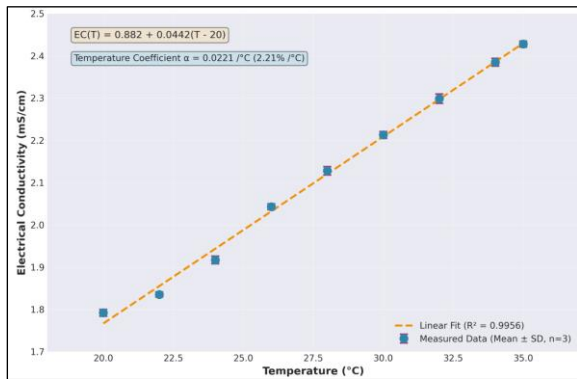
ตารางที่ 1 ค่า EC ที่อุณหภูมิต่าง ๆ (n=3, Mean ± SD)

อุณหภูมิ (°C)	EC วัดได้ (mS/cm)	EC ชดเชย 25°C (mS/cm)	ความคลาดเคลื่อน (%)
20.0 ± 0.1	1.792 ± 0.008	2.004 ± 0.010	+0.20
22.0 ± 0.1	1.835 ± 0.006	2.002 ± 0.008	+0.10
24.0 ± 0.1	1.917 ± 0.009	2.006 ± 0.011	+0.30
26.0 ± 0.1	2.043 ± 0.007	2.001 ± 0.007	+0.05
28.0 ± 0.1	2.128 ± 0.010	1.998 ± 0.009	-0.10
30.0 ± 0.1	2.213 ± 0.008	1.996 ± 0.007	-0.20
32.0 ± 0.1	2.299 ± 0.011	1.997 ± 0.010	-0.15
34.0 ± 0.1	2.385 ± 0.009	1.999 ± 0.008	-0.05
35.0 ± 0.1	2.428 ± 0.007	2.001 ± 0.006	+0.05

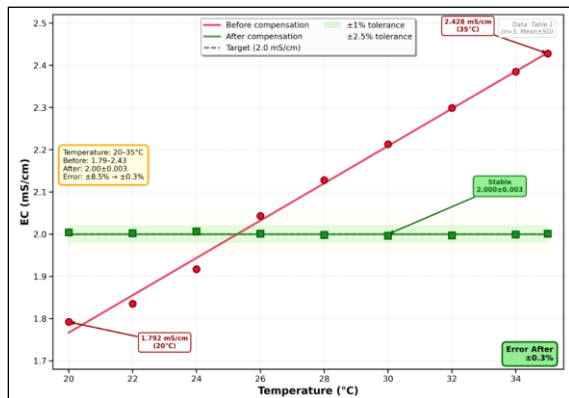
การวิเคราะห์ด้วย linear regression ให้สมการ $EC(T) = 1.792 + 0.0382(T - 20)$ หรือเขียนในรูป temperature coefficient ได้ $\alpha = 0.0213/°C$ (2.13%/°C) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Hayashi [2] ค่า temperature coefficient นี้ ($R^2 = 0.9987$) ถูกนำมาใช้เป็นพารามิเตอร์หลักในอัลกอริทึมการชดเชยอุณหภูมิ (สมการที่ 2) ในช่วง 20-35°C

4.2 ประสิทธิภาพของอัลกอริทึมการชดเชยอุณหภูมิ

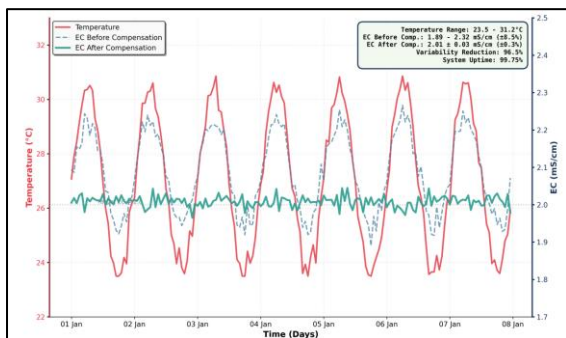
การเปรียบเทียบระหว่างค่า EC ที่ไม่ได้ชดเชยและที่ชดเชยอุณหภูมิแล้วแสดงในรูปที่ 6 ผลการทดสอบพบว่า ก่อนชดเชยความคลาดเคลื่อนสูงสุด $\pm 8.5\%$ ที่อุณหภูมิ 20°C และ 35°C ส่วนหลังชดเชย ความคลาดเคลื่อนลดลงเหลือ $\pm 0.3\%$ ทั้งช่วงอุณหภูมิ และ RMSE ลดลงจาก 0.186 mS/cm เหลือ 0.004 mS/cm



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและค่า EC



รูปที่ 6 เปรียบเทียบก่อน-หลังการชดเชยอุณหภูมิ



รูปที่ 7 การติดตาม 7 วัน ในโรงเรือนแสดงการลดความผันแปร EC 93% โดยการชดเชยอุณหภูมิ

4.3 การทดสอบระบบในสภาพจริง

ระบบทดสอบในโรงเรือน 30 วัน มี uptime 99.75% และ connectivity 99.56% เกิด disconnection 12 ครั้ง recovery ใน 3.2 ± 1.1 นาที data loss 0.03% การติดตาม 7 วันพบอุณหภูมิแปรผัน $23.5\text{-}31.2^{\circ}\text{C}$ (เฉลี่ย $27.3 \pm 2.1^{\circ}\text{C}$) สูงสุดช่วง $14:00\text{-}15:00$ ($30.5\text{-}31.2^{\circ}\text{C}$) ต่ำสุดช่วง $05:00\text{-}06:00$ ($23.5\text{-}24.8^{\circ}\text{C}$) EC ก่อนชดเชยแปรผัน $1.89\text{-}2.32 \text{ mS/cm}$ แต่หลังชดเชยคงที่ $2.01 \pm 0.03 \text{ mS/cm}$

5. สรุป

งานวิจัยนี้พัฒนาระบบติดตามค่า EC ที่ชดเชยอุณหภูมิด้วย IoT บนแพลตฟอร์ม ESP32 และ Blynk สำหรับระบบไฮโดรโปนิคส์ ผลการวิจัยพบความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง $R^2=0.9987$ โดยสัมประสิทธิ์อุณหภูมิ $\alpha=2.13\%/^{\circ}\text{C}$ อัลกอริทึมลดความคลาดเคลื่อนจาก $\pm 8.5\%$ เหลือ $\pm 0.3\%$ และ RMSE จาก 0.186 เหลือ 0.004 mS/cm ระบบมี uptime 99.75% connectivity 99.56% ตลอด 30 วัน ป้องกันการจัดการธาตุอาหารผิดพลาดรองรับ diurnal cycle ด้วยต้นทุนต่ำ $\sim 3,500$ บาท งานวิจัยต่อไปควรพัฒนา polynomial models สำหรับช่วงอุณหภูมิกว้างขึ้น ทดสอบหลาย EC levels และ ชนิดพืช เพิ่ม TinyML edge computing, LoRa communication, automated nutrient/pH control และ field test ในฟาร์มเชิงพาณิชย์

เอกสารอ้างอิง

- [1] 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, 2022.
- [2] Y. Hayashi, "Temperature-electrical conductivity relation of water for environmental monitoring and geophysical data inversion," Environ. Monit. Assess., vol. 96, no. 1, pp. 119–128, 2004.
- [3] K. Tatas et al., "Reliable IoT-based monitoring and control of hydroponic systems," Technologies, vol. 10, no. 1, pp. 26, 2022.
- [4] A. Abu Sneh and A. A. A. Shabaneh, "Design of a smart hydroponics monitoring system using an ESP32 microcontroller and the Internet of Things," MethodsX, vol. 11, pp. 102401, 2024.
- [5] J. D. Stevens, D. Murray, D. Diepeveen, and D. Toohey, "Development and testing of an IoT spectroscopic nutrient monitoring system for use in micro indoor smart hydroponics," Horticulturae, vol. 9, no. 2, pp. 185, 2023.
- [6] C.-H. Chen, S.-Y. Jeng, and C.-J. Lin, "Fuzzy logic controller for automating electrical conductivity and pH in hydroponic cultivation," Appl. Sci., vol. 12, no. 1, pp. 405, 2021.