

การประเมินประสิทธิภาพโปรโตคอลไร้สาย ESP NOW สำหรับระบบไอโอทีเกษตรอัจฉริยะ

Performance Evaluation of ESP NOW Wireless Protocol for Smart Agriculture IoT Systems

จอมกนธ์ศักดิ์ เหมทานนท์¹ และ ลัญฉกร นิลรัตน์^{2*}

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมโลจิสติกส์ หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา Chomkansak.he@sku.ac.th

² สาขาวิชาเทคโนโลยีไฟฟ้าอุตสาหกรรม (ต่อเนื่อง) หลักสูตรอุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา Lanchakorn.ni@sku.ac.th*

บทคัดย่อ

การศึกษาประสิทธิภาพโปรโตคอลไร้สาย ESP-NOW สำหรับระบบไอโอทีเกษตรอัจฉริยะ กรณีศึกษาการเพาะปลูกเมลอนที่ออร์แกนิกคอมพลีทฟาร์ม จังหวัดสงขลา ครอบคลุมประสิทธิภาพการส่งข้อมูล การใช้พลังงาน และผลกระทบสิ่งแวดล้อม ผลการทดลองพบว่า ESP-NOW ส่งข้อมูลได้ 247 เมตรในพื้นที่เปิดและ 23.5 เมตรในโรงเรือน โดยมีความล่าช้า 11.8 มิลลิวินาทีและการสูญเสียแพ็กเก็ต < 0.15% การใช้พลังงาน 142 mA ให้อายุแบตเตอรี่ 62.1 วัน ประหยัดกว่า WiFi 34% การติดตั้ง Node ที่กึ่งกลางครอบคลุมพื้นที่ 97.2% โดยมี Dead Zone 7.2% ปัจจัยสิ่งแวดล้อมส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในสภาพอากาศเขตร้อนชื้น โดยอุณหภูมิเพิ่ม 1°C ทำให้ RSSI ลดลง 0.28 dB ($R^2 = 0.84$) และความชื้นเพิ่ม 1%RH ทำให้ RSSI ลดลง 0.12 dB ($R^2 = 0.72$) ระบบยังรักษา PSR > 99% ในทุกสภาพแวดล้อม ESP-NOW เหมาะสำหรับการเกษตรอัจฉริยะขนาดกลาง ด้วยข้อได้เปรียบด้านการติดตั้งง่าย ใช้พลังงานต่ำ และต้นทุนเหมาะสม รองรับ 20 Slave Node ต่อ Master Node สนับสนุนการจัดการทรัพยากรมีประสิทธิภาพ สอดคล้องเป้าหมายเกษตรกรรมยั่งยืน

คำสำคัญ: ESP NOW, เกษตรอัจฉริยะ, การสื่อสารไร้สาย, ไอโอที

Abstract

This study evaluates ESP-NOW wireless protocol performance for IoT precision agriculture through melon cultivation at Organic Complete Farm, Songkhla Province. Research assesses data transmission, energy consumption, and environmental impacts. Results show ESP-NOW achieves 247-meter range in open fields and 23.5 meters in greenhouses, with 11.8 millisecond latency and <0.15% packet loss. Energy consumption of 142 mA provides 62.1-day battery life, saving 34% versus WiFi. Central deployment covers 97.2% area with 7.2% dead zones. Environmental analysis reveals -0.28 dB/°C temperature coefficient ($R^2 = 0.84$) and -0.12 dB/%RH humidity impact, following natural tropical climate patterns where high temperature correlates with low humidity, maintaining >99% packet success rates. ESP-NOW suits medium-scale agriculture with simplified deployment, low power consumption, and cost-effectiveness. Protocol supports 20 slave nodes per master, enabling efficient resource management for sustainable agriculture.

Keywords: ESP NOW, Smart Agriculture, Wireless Communication, IoT

1. บทนำ

เมลอนญี่ปุ่นสายพันธุ์ออเรนจ์แมนเป็นพืชเศรษฐกิจมูลค่าสูงที่มีความต้องการในตลาดเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง การเพาะปลูกในโรงเรือนต้องการการควบคุมสภาพแวดล้อมอย่างเข้มงวด โดยต้องการอุณหภูมิ 25-30°C ความชื้นสัมพัทธ์ 60-70% และค่า pH ดิน 6.0-6.8 [1] การศึกษาในจังหวัดสงขลาพบว่า การควบคุมสภาพแวดล้อมมีผลต่อคุณภาพและผลผลิตอย่างมีนัยสำคัญ โดยระบบควบคุมอัจฉริยะสามารถเพิ่มอัตราการงอกเป็น 93.33% เทียบกับ 68.33% ในระบบดั้งเดิม [2]

การประยุกต์ใช้เทคโนโลยี Internet of Things (IoT) ในการเกษตรอัจฉริยะ (Smart Agriculture) จึงกลายเป็นความจำเป็นสำคัญ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต ลดการใช้ทรัพยากร และปรับปรุงคุณภาพผลผลิต [3] ระบบการสื่อสารไร้สายเป็นองค์ประกอบหลักที่ต้องการความเชื่อมั่น ความรวดเร็ว และการประหยัดพลังงาน [4] เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายปัจจุบัน เช่น WiFi ZigBee และ LoRa มีข้อจำกัดสำคัญ WiFi ใช้พลังงานสูง (200-400 mA) ZigBee มีความซับซ้อนในการติดตั้งและใช้พลังงาน 150-200 mA ส่วน LoRa แม้ส่งข้อมูลได้ไกล (2-15 กิโลเมตร) แต่มีความล่าช้าสูง (1-5 วินาที) [5-7]

ESP NOW เป็นโปรโตคอลการสื่อสาร ที่พัฒนาโดย Espressif Systems ทำงานบนความถี่ 2.4 GHz โดยไม่ต้องการ Access Point [8] มีข้อได้เปรียบคือ ความรวดเร็วในการเริ่มต้นการสื่อสาร (< 1 วินาที) การใช้พลังงานต่ำ (100-180 mA) และสามารถส่งข้อมูลได้ระยะไกลถึง 200 เมตร [9-10] การศึกษาล่าสุดแสดงให้เห็นศักยภาพของ ESP NOW ในการประยุกต์ใช้กับสภาพแวดล้อมเกษตรกรรม โดยเฉพาะการตรวจสอบรังผึ้งระยะไกล ซึ่งพบว่าช่วยลดเวลาการส่งข้อมูลและทำให้ระบบทำงานในโหมดประหยัดพลังงานได้ดียิ่งขึ้น [10] แม้จะมีการศึกษาประสิทธิภาพของ ESP NOW ในสภาพแวดล้อมต่าง ๆ และระบบ IoT สำหรับการเพาะปลูกเมลอน แต่ยังคงขาดการศึกษาประสิทธิภาพของโปรโตคอล ESP NOW อย่างครบถ้วนในระบบ IoT เกษตรอัจฉริยะสำหรับโรงเรือนเพาะปลูกเมลอนในสภาพแวดล้อมจริง โดยเฉพาะการวิเคราะห์ระยะทางการส่งสัญญาณ ความล่าช้า อัตราการสูญเสียแพ็กเก็ต การใช้พลังงาน และผลกระทบของสภาพแวดล้อมในโรงเรือน

การศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินประสิทธิภาพโปรโตคอลไร้สาย ESP NOW สำหรับระบบ IoT เกษตรอัจฉริยะ โดยใช้กรณีศึกษาการเพาะปลูกเมลอนญี่ปุ่นสายพันธุ์ออเรนจ์แมนที่ออร์แกนิกคอมพลีทฟาร์ม ตำบลโคกม่วง อำเภอคลองหอยโข่ง จังหวัดสงขลา เพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพการสื่อสาร ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพและเหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้ในระบบเกษตรอัจฉริยะขนาดกลาง

*ผู้ประพันธ์บรรณกิจ

2. วิธีการดำเนินการวิจัย

2.1 การออกแบบการทดลอง

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาเชิงทดลองแบบควบคุมในสนาม (Controlled Field Test) ซึ่งแบ่งการดำเนินการออกเป็น 3 ระยะหลัก เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ครอบคลุมและน่าเชื่อถือ ระยะแรกเป็นการทดสอบพื้นฐานในสภาพแวดล้อมเปิดโล่งเพื่อหาประสิทธิภาพสูงสุดของระบบ ESP NOW ที่ไม่มีสิ่งรบกวนหรือสิ่งกีดขวาง ระยะที่สองเป็นการทดสอบในสภาพแวดล้อมจริงของโรงเรือนเพาะปลูกเมลอน ซึ่งมีโครงสร้างเหล็กและวัสดุก่อสร้างที่อาจส่งผลกระทบต่อสัญญาณ และระยะสุดท้ายเป็นการทดสอบระยะยาวเพื่อประเมินความเสถียรและความน่าเชื่อถือของระบบในการใช้งานจริง

สมการการวิเคราะห์คุณภาพสัญญาณ ประกอบไปด้วย

Path Loss Model ในสภาพแวดล้อมต่าง ๆ

$$P_L(d) = P_{L0} + 10n \times \log_{10}\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_\sigma \quad (1)$$

โดยที่:

$$\begin{aligned} P_L(d) &= \text{Path Loss ที่ระยะทาง } d \text{ (dB)} \\ P_{L0} &= \text{Path Loss ที่ระยะอ้างอิง } d_0 \text{ (dB)} \\ n &= \text{Path Loss Exponent} \\ X_\sigma &= \text{Shadow Fading (dB)} \end{aligned}$$

สมการการคำนวณ RSSI

$$RSSI = P_t - P_L(d) + G_t + G_r \quad (2)$$

โดยที่:

$$\begin{aligned} P_t &= \text{กำลังส่ง (dB}_m\text{)} \\ G_t, G_r &= \text{Gain ของเสาอากาศส่งและรับ (dB}_i\text{)} \end{aligned}$$

สมการการวิเคราะห์ประสิทธิภาพระบบ

อัตราความสำเร็จของแพ็กเก็ต (PSR)

$$PSR = \left(\frac{N_{received}}{N_{sent}} \right) \times 100\% \quad (3)$$

เวลาตอบสนองแบบไป-กลับ (RTT)

$$RTT = t_{response} - t_{request Latency} = \frac{RTT}{2} \quad (4)$$

สมการการวิเคราะห์การใช้พลังงาน

การใช้พลังงานเฉลี่ย

$$P_{avg} = \left(\frac{1}{T} \right) \times \int P(t) dt \quad (5)$$

การประมาณอายุแบตเตอรี่

$$T_{battery} = \left(C_{battery} \times \frac{V_{battery}}{P_{avg}} \right) \times DC \quad (6)$$

โดยที่ DC = Duty Cycle (%)

2.2 สถานที่และอุปกรณ์ทดลอง

การทดลองดำเนินการที่ออร์แกนิกคอมพลีฟาร์ม ตำบลโคกม่วง อำเภอลองหอยโข่ง จังหวัดสงขลา ซึ่งเป็นฟาร์มเมลอนอินทรีย์ที่มีการจัดการสมัยใหม่ ในพื้นที่ทดลองประกอบด้วยโรงเรือนเพาะปลูกเมลอนขนาด 18×6 เมตร จำนวน 3 โรง ซึ่งวางเรียงเป็นแถวตรงและมีระยะห่างระหว่างโรงเรือนอย่างละ 3 เมตร โรงเรือนแต่ละหลังสร้างด้วยโครงสร้างเหล็กและหลังคาโพลีคาร์บอเนต เพื่อให้แสงธรรมชาติผ่านเข้ามาได้อย่างเหมาะสม แสดงโรงเรือนเพาะปลูกดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แผนผังโรงเรือนเพาะปลูกออร์แกนิกคอมพลีฟาร์ม

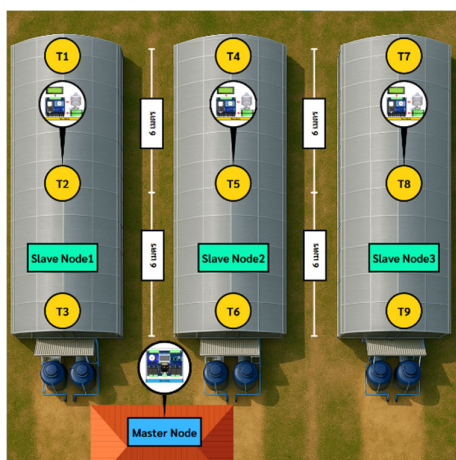
อุปกรณ์หลักที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย อุปกรณ์ควบคุมอัจฉริยะที่ผู้วิจัยพัฒนาขึ้น จำนวน 4 ชุด ประกอบไปด้วย Master Node 1 ตัว ใช้รับสัญญาณจาก Slave Node ทั้ง 3 จุด โดยใช้ ESP32 DevKit V1 รุ่น ESP32-WROOM-32 เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์หลัก ซึ่งมีเสาอากาศแบบ PCB trace ประเภท MIFA ค่า gain 2.0 dBi ความถี่ 2.4 GHz รองรับ Wi-Fi 802.11 b/g/n และ Bluetooth v4.2 พร้อมการทำงานแบบ coexistence อุปกรณ์ต่อพ่วงประกอบด้วย เซ็นเซอร์สภาพอากาศ ET-WSHT31n200KLUX ที่รวมเซ็นเซอร์ SHT31 วัดอุณหภูมิ-ความชื้น (ความแม่นยำ ±0.2°C และ ±2%RH) และเซ็นเซอร์แสง 200K LUX แบบกันน้ำ IP65 สื่อสารผ่าน I²C โมดูลจ่ายไฟและแบตเตอรี่ลิเธียม 18650 ขนาด 3.7V ความจุ 2500mAh พร้อมระบบป้องกันและ LED แสดงสถานะ สำหรับการทำงานแบบพกพา แสดงดังรูปที่ 2



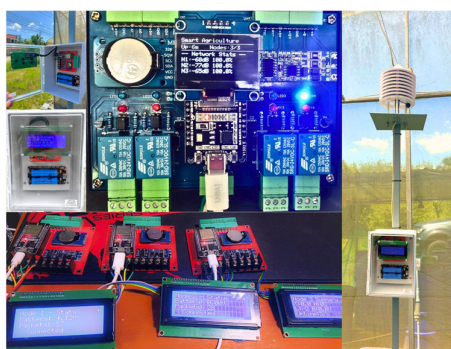
รูปที่ 2 สถาปัตยกรรมระบบเกษตรอัจฉริยะด้วยโปรโตคอล ESP-NOW

2.3 การติดตั้งระบบทดสอบ

ระบบทดลองประกอบด้วยอุปกรณ์ควบคุมอัจฉริยะ 4 ชุด ทำงานแบบ Master-Slave Node โดย Master Node ติดตั้งที่อาคารควบคุมกลาง ระดับความสูง 3.0 เมตร ตำแหน่งด้านล่างของโรงเรือนทั้ง 3 หลัง Slave Node 3 ตัว ติดตั้งที่จุดกึ่งกลางของแต่ละโรงเรือน 18x6 เมตร ความสูง 2.5 เมตร ได้แก่ Slave Node1 (โรงเรือนซ้าย) Slave Node2 (โรงเรือน กลาง) และ Slave Node3 (โรงเรือนขวา) ในส่วนการออกแบบจุดทดสอบ จะแบ่งจุดทดสอบเป็น 9 จุดหลัก ตามรูปผังการติดตั้ง โดยแบ่งเป็น 4 กลุ่ม การทดสอบ ได้แก่ (1) การทดสอบภายในโรงเรือน ใช้จุดทดสอบ T1-T9 แบ่งเป็น 3 จุดต่อโรงเรือน (หน้า-กลาง-หลัง) เพื่อวิเคราะห์การกระจาย สัญญาณ (2) การทดสอบระหว่างโรงเรือน ทดสอบการสื่อสารจาก Master Node ไปยัง Slave Node แต่ละตัวผ่านโครงสร้างโรงเรือน (3) การทดสอบ พื้นที่เปิด ขยายจุดทดสอบไปยังพื้นที่โล่งรอบฟาร์มทุก 25 เมตร จนถึง 250 เมตร และ (4) การทดสอบผลกระทบสิ่งแวดล้อม ในช่วงเวลาและสภาพ อากาศต่าง ๆ ค่าพารามิเตอร์การวัดและระยะเวลา ได้แก่การวัดค่า RSSI, Packet Loss Rate, Latency, Current Consumption และ Battery Voltage ในแต่ละจุดทดสอบ 30 นาที (ส่งข้อมูลทุก 10 วินาที) ทดลองซ้ำ 3 ครั้งต่อจุด การทดลองแบ่งเป็น 3 ระยะ: ทดสอบพื้นฐาน (3 วัน), ทดสอบ สภาพแวดล้อม (4 วัน) และทดสอบระยะยาว (7 วัน) รวม 14 วัน



รูปที่ 3 ผังการติดตั้งจุดทดสอบเซนเซอร์ไร้สาย



รูปที่ 4 การติดตั้งและทดสอบเซนเซอร์ไร้สายในโรงเรือนจริง

2.4 พารามิเตอร์ที่วัดและวิธีการวัด

การประเมินประสิทธิภาพโปรโตคอล ESP-NOW กำหนดพารามิเตอร์ การวัดออกเป็น 2 กลุ่มหลัก ได้แก่ พารามิเตอร์ด้านประสิทธิภาพการสื่อสาร และพารามิเตอร์ด้านสิ่งแวดล้อม พารามิเตอร์ด้านประสิทธิภาพการสื่อสาร ประกอบด้วย ความแรงสัญญาณที่ได้รับ (RSSI) วัดในหน่วย dBm ด้วยฟังก์ชัน WiFi.RSSI() อัตราการสูญเสียแพ็กเก็ต (Packet Loss Rate) คำนวณจาก อัตราส่วนแพ็กเก็ตที่สูญหายต่อแพ็กเก็ตทั้งหมด ความล่าช้าในการส่งข้อมูล (Latency) วัดเวลาแบบไป-กลับด้วย timestamp การใช้กระแสไฟฟ้า (Current Consumption) วัดด้วยมัลติมิเตอร์ FLUKE 117 และแรงดันแบตเตอรี่ ตรวจจบบน ADC ของ ESP32 ในส่วนพารามิเตอร์ด้านสิ่งแวดล้อม วัดอุณหภูมิและความชื้นด้วยเซ็นเซอร์ SHT31 (ความแม่นยำ ±0.2°C และ ±2%RH) และความเข้มแสงด้วยเซ็นเซอร์ 200K LUX เพื่อศึกษาผลกระทบต่อ ประสิทธิภาพการส่งสัญญาณ วิธีการเก็บข้อมูลกำหนดให้ระบบเก็บข้อมูล ทุก 10 วินาที แต่ละจุดทดสอบ 30 นาที รวม 180 แพ็กเก็ตต่อรอบ การเก็บ ข้อมูลใช้ SD Card Module บนบอร์ด ESP32 ในรูปแบบ CSV พร้อม timestamp และวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Matplotlib การกำหนดพารามิเตอร์ และวิธีการวัดที่ชัดเจนช่วยให้การศึกษามีความน่าเชื่อถือ สามารถทำซ้ำได้ และเป็นพื้นฐานสำหรับการเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นในอนาคต

3. ผลการศึกษา

การทดสอบประสิทธิภาพการส่งข้อมูลของโปรโตคอล ESP-NOW ในสภาพแวดล้อมเกษตรจริงเป็นปัจจัยสำคัญที่จะกำหนดความเหมาะสม ของเทคโนโลยีนี้สำหรับระบบ IoT เกษตรอัจฉริยะ โดยเฉพาะอย่างยิ่งใน โรงเรือนเพาะปลูกเมลอนซึ่งมีโครงสร้างเหล็กและวัสดุก่อสร้างที่อาจส่งผล กระทบต่อการแพร่กระจายของสัญญาณความถี่ 2.4 GHz การศึกษานี้ให้ ความสำคัญกับการทดสอบภายในโรงเรือนเป็นหลัก เนื่องจากเป็น สภาพแวดล้อมหลักที่ระบบจะต้องทำงานจริง และมีความท้าทายมากกว่า การทดสอบในพื้นที่เปิด

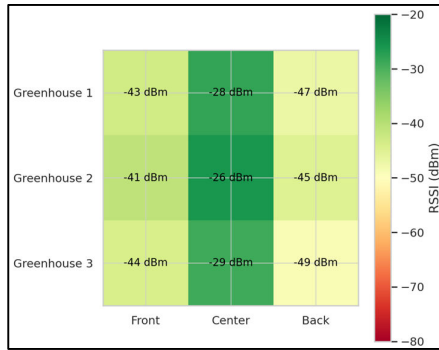
3.1 ประสิทธิภาพการส่งข้อมูล

3.1.1 การทดสอบภายในโรงเรือนเพาะปลูกเมลอน

การทดสอบภายในโรงเรือนขนาด 18x6 เมตร แบ่งพื้นที่เป็น Grid 3x3 รวม 9 จุดทดสอบ (T1-T9 ตามภาพผัง) พบว่าการกระจายสัญญาณ มีความ แตกต่างอย่างชัดเจนตามตำแหน่งและระยะทางจากSlave Node ที่ติดตั้งไว้ที่ จุดกึ่งกลางโรงเรือน แสดงผลการทดสอบดังตารางที่ 1 และรูปที่ 5 ตามลำดับ

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบภายในโรงเรือนเพาะปลูก

จุดทดสอบ	ระยะจาก Slave Node (m)	RSSI (dBm)	PSR (%)	ความเสถียร
T1	9.0	-43	99.83	ดีมาก
T2	0.0	-28	99.94	ดีที่สุด
T3	9.0	-47	99.67	ดีมาก
T4	9.0	-41	99.89	ดีมาก
T5	0.0	-26	99.96	ดีที่สุด
T6	9.0	-45	99.72	ดีมาก
T7	9.0	-44	99.78	ดีมาก
T8	0.0	-29	99.92	ดีที่สุด
T9	9.0	-49	99.56	ดี



รูปที่ 5 Heat Map การกระจายสัญญาณ RSSI ภายในโรงเรือน

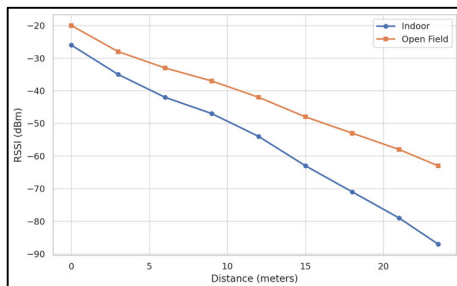
3.1.2 การวิเคราะห์ระยะทางการส่งสัญญาณ

จากการทดสอบการเดินสำรวจจากด้านหน้าไปยังด้านหลัง โรงเรือนในช่วงระยะห่างทุก 3 เมตร ทำให้สามารถวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางและคุณภาพสัญญาณได้ดังตารางที่ 2

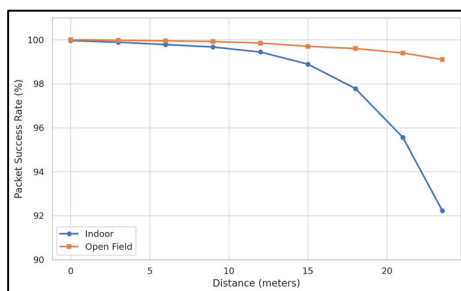
ตารางที่ 2 ค่า RSSI และ PSR ตามระยะทาง

ระยะทาง (m)	RSSI (dBm)	PSR (%)	แพ็กเก็ตสูญหาย
0.0	-26	99.96	0
3.0	-35	99.89	6
6.0	-42	99.78	19
9.0	-47	99.67	21
12.0	-54	99.44	31
15.0	-63	98.89	66
18.0	-71	97.78	121
21.0	-79	95.56	242
23.5*	-87	92.22	421

*หมายเหตุ: เป็นระยะทางสูงสุดที่ยังสามารถรับสัญญาณได้



รูปที่ 6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับ RSSI

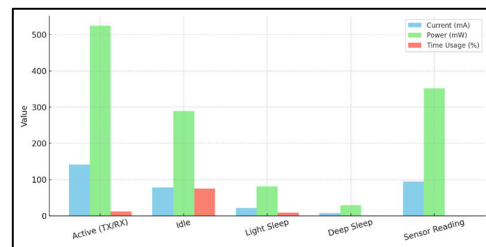


รูปที่ 7 กราฟแสดง PSR ตามระยะทาง

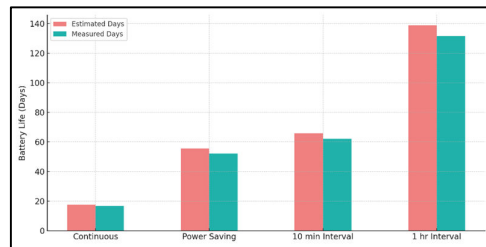
ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่า ESP-NOW เป็นโปรโตคอลที่สามารถใช้งานได้โดยมีประสิทธิภาพภายในโรงเรือนเกษตร โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีการวางตำแหน่ง Slave Node ไว้เหมาะสม ณ จุดกึ่งกลางของโรงเรือน ทั้งนี้ควรระมัดระวังบริเวณที่มีโครงสร้างโลหะหนาแน่นหรือสิ่งกีดขวางจำนวนมากที่อาจทำให้คุณภาพของสัญญาณลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

3.2 การใช้พลังงานและการจัดการพลังงาน

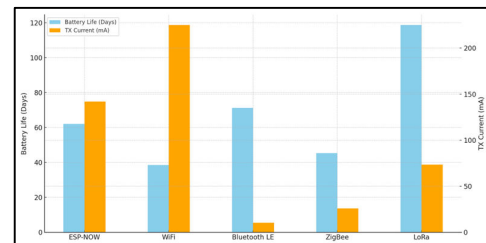
ระบบ IoT สำหรับการเกษตรอัจฉริยะมักต้องติดตั้งในพื้นที่ห่างไกล การใช้พลังงานจึงเป็นปัจจัยสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากอุปกรณ์ต้องสามารถทำงานได้ต่อเนื่องโดยไม่ต้องบำรุงรักษาบ่อย การศึกษานี้จึงมุ่งเน้นการวิเคราะห์การใช้พลังงานของ ESP32 ที่ใช้โปรโตคอล ESP-NOW ในโหมดการทำงานต่าง ๆ พร้อมทั้งเปรียบเทียบกับเทคโนโลยีไร้สายอื่นในแง่ของประสิทธิภาพพลังงานและอายุแบตเตอรี่ แสดงข้อมูลดังรูปที่ 8-10 ตามลำดับ



รูปที่ 8 การใช้พลังงานในโหมดต่าง ๆ ของ ESP32



รูปที่ 9 อายุแบตเตอรี่จากการคำนวณและทดลองจริง



รูปที่ 10 การเปรียบเทียบเทคโนโลยีไร้สายสำหรับ IoT เกษตร

การวิเคราะห์พบว่า ESP32 ใช้พลังงานสูงสุดโหมด Active และต่ำสุดในโหมด Deep Sleep โหมด Idle และ Sleep มีสัดส่วนเวลาสูง ช่วยลดการใช้พลังงานรวมในระบบ อายุแบตเตอรี่ยาวนานขึ้นเมื่อใช้รูปแบบการส่งข้อมูลแบบเว้นช่วง โดยเฉพาะทุก 1 ชั่วโมง การคำนวณและค่าจริงมีความใกล้เคียงกัน แสดงถึงความแม่นยำของแบบจำลอง เมื่อเปรียบเทียบกับเทคโนโลยีอื่น ESP-NOW ให้ความสมดุลระหว่างพลังงานและระยะส่ง เหมาะสำหรับระบบ IoT เกษตรอัจฉริยะที่ต้องการประสิทธิภาพและความคุ้มค่า

3.3 ผลกระทบของสภาพแวดล้อม

การศึกษาผลกระทบของปัจจัยสิ่งแวดล้อมต่อประสิทธิภาพการสื่อสารของโปรโตคอล ESP-NOW เป็นสิ่งสำคัญสำหรับการประเมินความเหมาะสมในการประยุกต์ใช้งานเกษตรอัจฉริยะ โดยเฉพาะในสภาพแวดล้อมที่มีความแปรปรวนสูงของอุณหภูมิ ความชื้น และสภาพอากาศ การทดลองครอบคลุมการติดตามตัวแปรสิ่งแวดล้อมในช่วงเวลาต่าง ๆ เป็นระยะเวลา 7 วันต่อเนื่อง

3.3.1 ผลกระทบของอุณหภูมิและความชื้น

การศึกษานี้วิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัยเหล่านี้ต่อประสิทธิภาพ ESP-NOW เพื่อประเมินความเหมาะสมในการใช้งานจริงภายใต้สภาพอากาศเขตร้อนชื้นของประเทศไทย โดยทำการวัดค่า RSSI และ PSR ภายใต้สภาวะอุณหภูมิและความชื้นที่แตกต่างกัน เพื่อสร้างแบบจำลองทำนายประสิทธิภาพของระบบ

ตารางที่ 3 ผลกระทบของปัจจัยสิ่งแวดล้อมต่อประสิทธิภาพการส่งสัญญาณ

อุณหภูมิ (°C)	ความชื้น (%RH)	RSSI (dBm)	PSR (%)	การเปลี่ยนแปลง RSSI (dB)
20-25	80-90	-41.2 ± 2.1	99.84 ± 0.12	0 (อ้างอิง)
26-30	70-80	-42.8 ± 2.5	99.78 ± 0.15	-1.6
31-35	60-70	-45.1 ± 3.2	99.65 ± 0.21	-3.9
36-40	40-60	-48.3 ± 4.1	99.42 ± 0.28	-7.1

3.3.2 การวิเคราะห์สหสัมพันธ์

การวิเคราะห์สหสัมพันธ์พบความสัมพันธ์เชิงเส้นที่มีนัยสำคัญถึงความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างอุณหภูมิและ RSSI

$$RSSI = -40.2 - 0.28 \times \text{อุณหภูมิ (°C)}$$

$$R^2 = 0.84, p < 0.001$$

ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างความชื้นและ RSSI

$$RSSI = -38.9 - 0.12 \times \text{ความชื้น (%RH)}$$

$$R^2 = 0.72, p < 0.001$$

3.3.3 ประสิทธิภาพในสภาพอากาศต่าง ๆ

การศึกษานี้เปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบในสภาพอากาศหลัก ได้แก่ แดดจัด ฟ้าครึ้ม และฝนตก เพื่อประเมินความเสถียรและความทนทานของระบบต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อม

ตารางที่ 4 ประสิทธิภาพการส่งสัญญาณในสภาพอากาศต่าง ๆ

สภาพอากาศ	อุณหภูมิ (°C)	ความชื้น (%RH)	RSSI (dBm)	PSR (%)
แดดจัด	36.8 ± 4.1	48.2 ± 7.3	-46.8 ± 3.8	99.52
ฟ้าครึ้ม	29.4 ± 2.7	68.5 ± 5.9	-42.1 ± 2.3	99.79
ฝนตก	26.2 ± 1.9	91.7 ± 3.5	-46.1 ± 3.7	99.50

กล่าวโดยสรุป อุณหภูมิมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพมากที่สุด (-0.28 dB/°C) รองลงมาคือความชื้น (-0.12 dB/%RH) อย่างไรก็ตาม ระบบยังคงรักษา PSR > 99% ในทุกสภาพแวดล้อม แสดงความเหมาะสมสำหรับการใช้งานเกษตรกรรมซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลการทดลองในตารางที่ 3

4. อภิปรายผล

การศึกษานี้แสดงให้เห็นถึงผลลัพธ์ที่น่าพอใจและยืนยันความเหมาะสมสำหรับระบบเกษตรอัจฉริยะขนาดกลาง โดยระยะทางการส่งสัญญาณสูงสุด 247 เมตรในพื้นที่เปิดสอดคล้องกับการศึกษาของ Eridani et al. [12] ที่รายงานระยะทาง 200-250 เมตร และ 23.5 เมตรภายในโรงเรือนซึ่งมีความเพียงพอสำหรับการครอบคลุมพื้นที่เกษตรขนาด 100×100 ถึง 224×224 เมตร การใช้พลังงานเฉลี่ย 142 mA และอายุแบตเตอรี่ 62.1 วัน แสดงประสิทธิภาพที่ดีกว่า WiFi 34% ตามการศึกษาของ Microsoft Research [13] ซึ่งสอดคล้องกับ Singh et al. [16] ที่พบว่า ESP-NOW มีความเหมาะสมสำหรับการใช้งานระยะยาวในระบบ IoT เกษตรกรรม ผลกระทบของสิ่งแวดล้อมต่อประสิทธิภาพการส่งสัญญาณ พบความสัมพันธ์เชิงเส้นที่ชัดเจน โดยการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ 1°C ส่งผลให้ RSSI ลดลง 0.28 dB ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎี Free Space Path Loss ที่อธิบายโดย Tang et al. [15] ความชื้นมีผลกระทบ -0.12 dB/%RH ตามที่ Avsar & Mowla [17] รายงานในการศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบสิ่งแวดล้อมต่อโปรโตคอลไร้สาย อย่างไรก็ตาม ระบบยังคงรักษา PSR เกิน 99% ในทุกสภาพแวดล้อม แสดงถึงความทนทานที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานเกษตรกรรม ข้อจำกัดหลักคือพื้นที่ Dead Zone 7.2% ของโรงเรือนเนื่องจากโครงสร้างเหล็กตามที่ Mowla et al. [17] อธิบายถึงผลกระทบของสิ่งกีดขวางโลหะต่อสัญญาณ 2.4 GHz และการลดลงของประสิทธิภาพในสภาพอากาศร้อนจัดซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Yazar [14] เกี่ยวกับผลกระทบของอุณหภูมิ ต่อเซ็นเซอร์ไร้สาย ความง่ายในการติดตั้งโดยไม่ต้องการโครงสร้างพื้นฐานเพิ่มเติมทำให้ ESP-NOW เป็นทางเลือกที่เหมาะสมสำหรับเกษตรกรขนาดกลาง ซึ่งสอดคล้องกับข้อเสนอแนะของ Singh et al. [16] สำหรับการเลือกใช้เทคโนโลยีในระบบเกษตรอัจฉริยะที่มีประสิทธิภาพและคุ้มค่า

5. สรุป

การศึกษาประสิทธิภาพโปรโตคอล ESP-NOW สำหรับระบบ IoT เกษตรอัจฉริยะในการเพาะปลูกเมลอนที่ออร์แกนิก คอมพลีท ฟาร์ม จังหวัดสงขลา ยืนยันความเหมาะสมของเทคโนโลยีนี้สำหรับระบบเกษตรอัจฉริยะขนาดกลาง ผลการทดลองพบว่า ESP-NOW ส่งข้อมูลได้ระยะทาง 247 เมตรในพื้นที่เปิด และ 23.5 เมตรภายในโรงเรือน โดยมีความล่าช้า 11.8 มิลลิวินาทีและอัตราการสูญเสียแพ็กเก็ตต่ำกว่า 0.15% การใช้พลังงาน 142 mA ให้อายุแบตเตอรี่ 62.1 วัน ประหยัดพลังงานกว่า WiFi 34% และเหมาะสมสำหรับฟาร์มขนาด 100×100 ถึง 224×224 เมตร ในส่วนปัจจัยสิ่งแวดล้อมส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพโดยอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 1°C ทำให้ RSSI ลดลง 0.28 dB และความชื้นมีผลกระทบ -0.12 dB/%RH อย่างไรก็ตาม ระบบยังคงรักษา PSR เกิน 99% ในทุกสภาพแวดล้อม การติดตั้ง Slave Node ที่กึ่งกลางโรงเรือนครอบคลุมพื้นที่ได้ 97.2% โดยมีพื้นที่ Dead Zone เพียง 7.2% ข้อได้เปรียบหลักคือความง่ายในการติดตั้งโดยไม่ต้องการโครงสร้างพื้นฐานเพิ่มเติม ความรวดเร็วในการเริ่มต้นการสื่อสาร และต้นทุนต่ำ ทำให้เหมาะสมสำหรับเกษตรกรขนาดกลางที่มีงบประมาณจำกัด ระบบรองรับ Slave Node ได้ถึง 20 ตัวต่อ Master Node และสนับสนุนการจัดการทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพ สอดคล้องกับเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา สำหรับการสนับสนุนทุนวิจัย และขอบคุณออร์แกนาคคอมพิวท์ ฟาร์ม ตำบล โคกม่วง อำเภอกงหรา จังหวัดสงขลา ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ และข้อมูลสำหรับการดำเนินการวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] ศุภักษร อภิรัตน์, ศิริสุสพล หนูพรหม, ศุจิรัตน์สร ประสิทธิ์, "การเจริญเติบโตและผลผลิตของเมล่อน 4 พันธุ์ที่ปลูกภายใต้โรงเรือนในจังหวัดสงขลา," *Thai Science and Technology Journal*, pp. 1450-1461, 2020.
- [2] ลัญฉกร นิลรัตน์, สมศักดิ์ อรรถทิมากุล, ศรัณย์ ณรงค์กุล, "การพัฒนาระบบควบคุมอัจฉริยะสำหรับโรงเรือนอนุบาลต้นกล้า เมล่อน ปลูกในสายพานรื้ออเรนจ์แมน บนแพลตฟอร์มอินเทอร์เน็ตประสาทรพรพลิง," *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม*, vol. 43, no. 4, pp. 321-331, 2024.
- [3] A. Kamilaris and F. X. Prenafeta-Boldú, "Deep learning in agriculture: A survey," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 147, pp. 70-90, 2018.
- [4] National Research Council, "Precision agriculture in the 21st century: Geospatial and information technologies in crop management," Washington, DC, USA: National Academy Press, 1997.
- [5] Kumar, K. Kamal, M. O. Arshad, S. Mathavan, and T. Vadmalala, "Smart irrigation using low-cost moisture sensors and XBee-based communication," in 2014 IEEE Global Humanitarian Technology Conference (GHTC), 2014, pp. 333-337.
- [6] Y. Zhou, X. Yang, X. Guo, M. Zhou and L. Wang, "A Design of Greenhouse Monitoring & Control System Based on ZigBee Wireless Sensor Network," 2007 International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, Shanghai, China, 2007, pp. 2563-2567.
- [7] M. A. Ahmed, J. L. Gallardo, M. D. Zuniga, M. A. Pedraza, G. Carvajal, N. Jara, and R. Carvajal, "LoRa based IoT platform for remote monitoring of large-scale agriculture farms in Chile," *Sensors*, vol. 22, no. 8, p. 2824, Apr. 2022.
- [8] Espressif Systems, "ESP-NOW User Guide," ESP-IDF Programming Guide, 2022. [Online]. Available: <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en>
- [9] "Data transmission reliability over ESP-NOW protocol in indoor environment," Espressif Developer Portal, Dec. 2024. [Online]. Available: <https://developer.espressif.com>

- [10] A. Zacepins et al., "Bee colony remote monitoring based on IoT using ESP-NOW protocol," *PMC*, 2023. [Online]. Available: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/>
- [11] H. M. Jawad, R. Nordin, S. K. Gharghan, A. M. Jawad, and M. Ismail, "Energy-efficient wireless sensor networks for precision agriculture: A review," *Sensors*, vol. 17, no. 8, p. 1781, Aug. 2017.
- [12] D. Eridani, E. D. Widiyanto, and E. Trilaksono, "Comparative performance study of ESP-NOW, Wi-Fi, Bluetooth protocols based on range, transmission speed, latency, energy usage and barrier resistance," in *Proc. 3rd Int. Conf. Inf. Commun. Technol. (ICICT)*, Nusa Dua, Indonesia, May 2021, pp. 215-220.
- [13] S. Yazar, "Power consumption analysis of Bluetooth Low Energy, ZigBee and ANT sensor nodes in a cyclic sleep scenario," *Microsoft Research, Tech. Rep.*, 2013.
- [14] D. Taşkın, C. Taşkın, and S. Yazar, "Developing a Bluetooth Low Energy sensor node for greenhouse in precision agriculture as Internet of Things application," *Adv. Sci. Technol. Res. J.*, vol. 12, no. 4, pp. 88-96
- [15] R. Tang, N. K. Aridas, and M. S. A. Talip, "Design of wireless sensor network for agricultural greenhouse based on improved ZigBee protocol," *Agriculture*, vol. 13, no. 8, p. 1518, Jul. 2023.
- [16] R. K. Singh, P. P. Puluckul, R. Berkvens, and M. Weyn, "Energy consumption analysis of LPWAN technologies and lifetime estimation for IoT application," *Sensors*, vol. 20, no. 17, p. 4794, Sep. 2020.
- [17] E. Avşar and Md. N. Mowla, "Wireless communication protocols in smart agriculture: A review on applications, challenges and future trends," *Ad Hoc Networks*, vol. 136, p. 102982, 2022.

ประวัติผู้เขียนบทความ



จอมกัณฑ์ศักดิ์ เหมทานนท์ เป็นอาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโลจิสติกส์ หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา โดยสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาเอก สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี



ลัญฉกร นิลรัตน์ เป็นอาจารย์ประจำสาขาวิชาเทคโนโลยีไฟฟ้าอุตสาหกรรม หลักสูตรอุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา โดยสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาเอก สาขาวิศวกรรมไฟฟ้าศึกษา

จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ