

การออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์ระบุตำแหน่งแบบไร้สายด้วยเทคโนโลยี LoRa ร่วมกับระบบประหยัดพลังงาน

อัศวินวิทย์ คงแสงจันทร์¹, จตุรภัทร พรหมมาศ¹ และ นันทิยา ชัยบุตร^{1*}

¹สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยกรุงเทพ

*nuntiya.c@bu.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์รับ-ส่งสัญญาณแจ้งตำแหน่งแบบไร้สายเพื่อแก้ไขปัญหาการค้นหาคู่มือหรือวัตถุในพื้นที่ขนาดใหญ่ เช่น คลังสินค้าและห้องปฏิบัติการ ซึ่งใช้เวลาในการค้นหาและส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการทำงานโดยรวม ระบบที่พัฒนาขึ้นใช้เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายแบบ LoRa โดยประกอบด้วยอุปกรณ์ภาคส่งและภาครับที่สามารถสื่อสารกันผ่านการกำหนดรหัสประจำตัว (Address) และแสดงตำแหน่งของอุปกรณ์ภาครับผ่านสัญญาณไฟแอลอีดี (LED) และเสียง (Buzzer) เพื่อช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถระบุตำแหน่งของอุปกรณ์ได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ นอกจากนี้ระบบยังได้รับการออกแบบให้มีโหมดประหยัดพลังงาน โดยอาศัยการทำงานร่วมกันระหว่างโหมดพักการทำงานเชิงลึก (Deep Sleep Mode) ของไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 และกลไกตรวจจับกิจกรรมบนช่องสัญญาณ (Channel Activity Detection: CAD) ของโมดูล LoRa ทำให้อุปกรณ์รับสัญญาณสามารถลดการใช้พลังงานในช่วงที่ไม่มีการใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยลดการใช้กระแสไฟฟ้าจาก 390 mA เหลือเพียง 0.01 mA หรือคิดเป็นการประหยัดพลังงานร้อยละ 99.997

การทดลองดำเนินการโดยทดสอบการสื่อสารในระยะตั้งแต่ 10 ถึง 120 เมตร พบว่าระบบสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพในระยะไม่เกิน 50 เมตร โดยมีค่าความถูกต้องร้อยละ 100 และสามารถรับ-ส่งสัญญาณพร้อมแสดงผลการแจ้งเตือนได้อย่างชัดเจน นอกจากนี้ยังสามารถสื่อสารได้ถึงระยะ 100 เมตร แม้ว่าประสิทธิภาพของสัญญาณไฟและเสียงแจ้งเตือนจะลดลงเมื่อระยะทางเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ระบบไม่สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพที่ระยะ 120 เมตร ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าอุปกรณ์รับ-ส่งสัญญาณแจ้งตำแหน่งแบบไร้สายที่พัฒนาขึ้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการค้นหาและระบุตำแหน่งอุปกรณ์หลายรายการพร้อมกันได้ ช่วยลดระยะเวลาในการค้นหา เพิ่มประสิทธิภาพการบริหารจัดการทรัพยากร และยืดอายุการใช้งานของอุปกรณ์ที่ใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ได้เป็นอย่างดี

คำสำคัญ: การสื่อสารไร้สายแบบ LoRa ระบบระบุตำแหน่ง อินเทอร์เน็ตทุกสรรพสิ่ง การประหยัดพลังงาน

Design and Development of a LoRa-Based Wireless Location System with Energy-Efficient Mechanism

Akkarawit Kongsangjan¹, Jaturaphat Prommas¹ and Nuntiya Chaiyabut^{1*}

¹Electrical Engineering Department, School of Engineering, Bangkok University

*nuntiya.c@bu.ac.th

Abstract

This paper presents the design and development of a wireless location notification system to address the problem of locating equipment or objects in large areas, such as warehouses and laboratories, where search processes are time-consuming and negatively affect overall operational efficiency. The proposed system employs LoRa wireless communication technology and consists of transmitter and receiver units that communicate through predefined device addresses. The receiver unit indicates its location using a light-emitting diode (LED) and a buzzer, enabling users to locate target equipment quickly and accurately.

In addition, the system incorporates an energy-efficient mechanism by integrating the Deep Sleep Mode of the ESP32 microcontroller with the Channel Activity Detection (CAD) feature of the LoRa module. This approach significantly reduces power consumption during idle periods while maintaining reliable signal detection when required. Experimental results show that the receiver's current consumption can be reduced from 390 mA during normal operation to only 0.01 mA in sleep mode, corresponding to an energy saving of 99.997%.

The system was evaluated through communication tests at distances ranging from 10 to 120 meters. The results indicate that the proposed system operates effectively within a range of up to 50 meters, achieving 100% accuracy while providing clear visual and audible notifications. Communication remains possible at distances of up to 100 meters; however, the effectiveness of the LED and buzzer notifications decreases as the distance increases. At a distance of 120 meters, the system can no longer operate reliably. The findings demonstrate that the developed wireless location notification system can be applied to the simultaneous localization of multiple devices, helping reduce search time, improve resource management efficiency, and extend the battery life of battery-powered devices.

Keywords: LoRa Wireless Communication, Localization System, Internet of Things (IoT), Energy Efficiency

1. บทนำ

ปัจจุบันการบริหารจัดการอุปกรณ์ เครื่องมือ และทรัพยากรในพื้นที่ขนาดใหญ่ เช่น คลังสินค้า ห้องปฏิบัติการ โรงงาน อุตสาหกรรม และศูนย์บริการ มีความสำคัญต่อประสิทธิภาพการดำเนินงานขององค์กรเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะในกรณีที่มีอุปกรณ์จำนวนมากถูกจัดเก็บอยู่ในพื้นที่เดียวกัน การค้นหาอุปกรณ์ที่ต้องการจึงมักใช้เวลานานและก่อให้เกิดความล่าช้าใน

การปฏิบัติงาน ส่งผลต่อประสิทธิภาพการใช้ทรัพยากรและต้นทุนในการดำเนินงานโดยรวม ดังนั้นการพัฒนาระบบที่สามารถช่วยค้นหาและระบุตำแหน่งของอุปกรณ์ได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำจึงเป็นแนวทางที่ได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง

เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตทุกสรรพสิ่ง (Internet of Things: IoT) ได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในการเชื่อมต่ออุปกรณ์และส่งผ่านข้อมูลผ่านเครือข่ายสื่อสารไร้สาย โดยเทคโนโลยี LoRa (Long Range) เป็นหนึ่งในเทคโนโลยีที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย เนื่องจากสามารถสื่อสารข้อมูลได้ในระยะทางไกล ใช้พลังงานต่ำ และรองรับการเชื่อมต่ออุปกรณ์จำนวนมาก [1] โมดูล LoRa ตระกูล SX1276/77/78/79 ได้รับการออกแบบให้รองรับการสื่อสารในย่านความถี่ต่ำและมีความไวในการรับสัญญาณสูง จึงเหมาะสำหรับการพัฒนาระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายและระบบระบุตำแหน่งอุปกรณ์ในงานด้านอินเทอร์เน็ตทุกสรรพสิ่ง [2]

สำหรับงานระบุตำแหน่งและติดตามอุปกรณ์ มีการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีหลายประเภท ได้แก่ RFID, Bluetooth Low Energy (BLE), Wi-Fi, เครือข่ายเซลลูลาร์ (3G/4G) และ LoRa ซึ่งแต่ละเทคโนโลยีมีคุณลักษณะและขอบเขตการใช้งานแตกต่างกัน โดย RFID เหมาะสำหรับการระบุตัวตนของวัตถุในระยะใกล้ BLE เหมาะสำหรับระบบระบุตำแหน่งภายในอาคารที่ต้องการความละเอียดของตำแหน่ง ส่วน Wi-Fi และเครือข่ายเซลลูลาร์ เช่น 3G สามารถรองรับการรับส่งข้อมูลปริมาณมากและครอบคลุมพื้นที่กว้าง แต่มีการใช้พลังงานสูงกว่า ต้องอาศัยโครงสร้างพื้นฐานของผู้ให้บริการเครือข่าย และมีค่าใช้จ่ายในการสื่อสาร อย่างไรก็ตาม LoRa เป็นเทคโนโลยีประเภท Low-Power Wide Area Network (LPWAN) ที่ได้รับการออกแบบสำหรับงานเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตทุกสรรพสิ่ง โดยสามารถสื่อสารได้ในระยะทางไกล ใช้พลังงานต่ำ และสามารถพัฒนาเป็นเครือข่ายส่วนตัว (Private Network) ได้ จึงเหมาะสำหรับระบบค้นหาและติดตามอุปกรณ์ที่ใช้แบตเตอรี่ ซึ่งต้องการการสื่อสารระยะไกลและการใช้พลังงานต่ำ [3, 4]

งานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการประยุกต์ใช้เทคโนโลยี LoRa ในงานระบุตำแหน่งและติดตามอุปกรณ์หลากหลายรูปแบบ โดย Fargas และ Petersen [5] ได้นำเสนอแนวทางการระบุตำแหน่งโดยไม่พึ่งพาระบบจีพีเอสผ่านการใช้เครือข่าย LoRa ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการประยุกต์ใช้งานด้านการค้นหาและระบุตำแหน่งวัตถุ นอกจากนี้ Petajajarvi และคณะ [6] ได้ศึกษาประสิทธิภาพการสื่อสารและระยะครอบคลุมของเทคโนโลยี LoRa พบว่าสามารถสื่อสารได้ในระยะทางไกลพร้อมการใช้พลังงานต่ำ จึงเหมาะสำหรับอุปกรณ์ที่ทำงานด้วยแบตเตอรี่และระบบอินเทอร์เน็ตทุกสรรพสิ่งที่ต้องการยืดอายุการใช้งานให้มากขึ้น

อย่างไรก็ตาม ระบบระบุตำแหน่งอุปกรณ์ที่ใช้แบตเตอรี่ยังคงเผชิญข้อจำกัดด้านการใช้พลังงาน โดยเฉพาะอุปกรณ์ภาครับที่ต้องเปิดทำงานอย่างต่อเนื่องเพื่อรอรับข้อมูลจากภาคส่ง ส่งผลให้เกิดการใช้พลังงานสูงและลดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ งานศึกษาด้านการจัดการพลังงานในอุปกรณ์สื่อสารไร้สายพบว่า การประยุกต์ใช้โหมดพักการทำงาน (Sleep Mode) สามารถลดการใช้พลังงานของอุปกรณ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ [7] ดังนั้นการออกแบบระบบระบุตำแหน่งที่สามารถทำงานร่วมกับกลไกประหยัดพลังงานจึงเป็นประเด็นสำคัญที่ควรได้รับการพัฒนาเพิ่มเติม

บทความนี้นำเสนอการออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์รับ-ส่งสัญญาณแจ้งตำแหน่งแบบไร้สายด้วยเทคโนโลยี LoRa ร่วมกับระบบประหยัดพลังงาน โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 และโมดูล LoRa SX1278 เป็นองค์ประกอบหลักของระบบ อุปกรณ์ถูกออกแบบให้สามารถระบุตำแหน่งของอุปกรณ์ปลายทางผ่านการแจ้งเตือนด้วยแสงและเสียง พร้อมทั้งประยุกต์ใช้โหมดพักการทำงานเชิงลึก (Deep Sleep Mode) ร่วมกับกลไกตรวจจับกิจกรรมบนช่องสัญญาณ (Channel Activity Detection: CAD) เพื่อลดการใช้พลังงานของอุปกรณ์รับสัญญาณ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการสื่อสาร ความถูกต้องในการระบุตำแหน่ง และประสิทธิภาพการประหยัดพลังงานของระบบ เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาระบบค้นหาอุปกรณ์และการบริหารจัดการทรัพยากรต่อไป

2. วิธีวิจัย

2.1 ภาพรวมการทำงาน

อุปกรณ์ระบุตำแหน่งแบบไร้สายด้วยเทคโนโลยี LoRa ร่วมกับระบบประหยัดพลังงานถูกออกแบบและพัฒนาขึ้นจากอุปกรณ์หลักคือ ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32, โมดูล LoRa SX1278, หลอดแอลอีดีความสว่างสูง (Super LED), ออดสัญญาณเสียง (Buzzer), รีเลย์ และแบตเตอรี่ โดยมีการพัฒนาโปรแกรมสำหรับกำหนดที่อยู่ (Address) ประจำตัวของอุปกรณ์รับสัญญาณซึ่งสามารถใช้สำหรับรับคำสั่งในกรณีต้องการค้นหาอุปกรณ์รับสัญญาณที่ต้องการและเพิ่มอุปกรณ์รับสัญญาณเข้าสู่ระบบ โดยอุปกรณ์ภาคส่งสัญญาณ 1 อุปกรณ์สามารถเชื่อมต่อเข้ากับอุปกรณ์ภาครับสัญญาณจำนวน 100 อุปกรณ์ นั่นคือระบบนี้สามารถนำไปใช้งานเพื่อค้นหาตำแหน่งของสินค้าได้ถึง 100 สินค้าต่ออุปกรณ์ภาคส่ง 1 ตัว โดยสามารถแสดงภาพหลักการทำงานของระบบระบุตำแหน่งแบบไร้สายด้วยเทคโนโลยี LoRa ร่วมกับระบบประหยัดพลังงานได้ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ภาพรวมหลักการทำงานของอุปกรณ์ระบุตำแหน่งแบบไร้สายด้วยเทคโนโลยี LoRa ร่วมกับระบบประหยัดพลังงาน

จากภาพที่ 1 ข้างต้น ขั้นตอนการทำงานของระบบสามารถแสดงได้ดังนี้

1. ผู้ใช้กำหนดที่อยู่หรือรหัสประจำตัวของอุปกรณ์ภาครับสัญญาณให้สอดคล้องกับอุปกรณ์ภาคส่งสัญญาณ เพื่อให้ทั้งสองอุปกรณ์สามารถสื่อสารกันได้อย่างถูกต้อง ถ้ามีการกำหนดไว้แล้วให้ข้ามไปขั้นตอนที่ 2
2. ผู้ใช้งานป้อนคำสั่งผ่านโปรแกรมบนคอมพิวเตอร์เพื่อระบุอุปกรณ์ปลายทางที่ต้องการเรียกใช้งาน
3. โปรแกรมส่งข้อมูลคำสั่งไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ผังส่งผ่านการสื่อสารแบบอนุกรม (Serial Communication)
4. ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ผังส่งประมวลผลข้อมูลที่ได้รับและสร้างแพ็คเกจข้อมูล ซึ่งประกอบด้วยรหัสประจำอุปกรณ์ปลายทาง (Address) และข้อมูลควบคุม
5. โมดูล LoRa SX1278 ผังส่งทำการส่งข้อมูลดังกล่าวผ่านคลื่นวิทยุไปยังอุปกรณ์ปลายทาง
6. โมดูล LoRa SX1278 ผังรับรับสัญญาณที่ถูกส่งมาจากฝั่งส่ง และส่งข้อมูลต่อไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ผังรับ
7. ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ผังรับทำการตรวจสอบรหัสประจำอุปกรณ์ (Address Verification) เพื่อยืนยันว่าข้อมูลดังกล่าวถูกส่งมายังอุปกรณ์ปลายทางที่ต้องการ
8. เมื่อรหัสอุปกรณ์ตรงกับที่กำหนดไว้ ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 จะสั่งงานอุปกรณ์แจ้งเตือน ประกอบด้วย หลอดไดโอดเปล่งแสงความสว่างสูง (Super LED) เพื่อแสดงผลด้วยแสงสว่าง และ ออดสัญญาณเสียง (Buzzer) เพื่อส่งสัญญาณเสียงแจ้งเตือน
9. ผู้ใช้งานสามารถสังเกตสัญญาณไฟและเสียงที่เกิดขึ้นเพื่อระบุตำแหน่งของอุปกรณ์ปลายทางได้อย่างรวดเร็ว
10. หลังจากครบระยะเวลาที่กำหนด หรือเมื่อผู้ใช้งานกดยืนยันการรับทราบ ระบบจะหยุดการแจ้งเตือนและกลับเข้าสู่สถานะรอรับคำสั่งใหม่

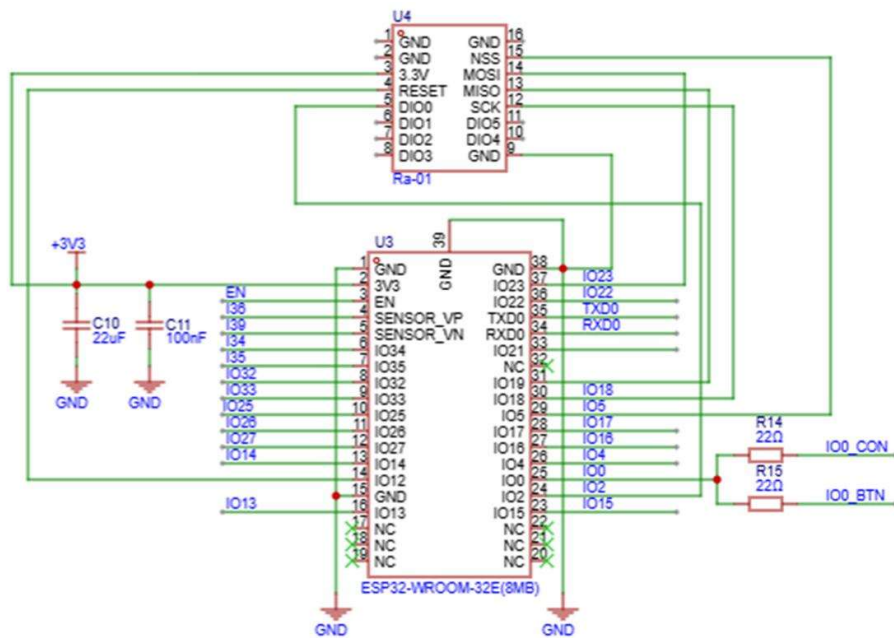
ทั้งนี้ระบบประหยัดพลังงานจะถูกออกแบบไว้ในขั้นตอนที่ 5 ซึ่งเป็นขั้นตอนในการส่งข้อมูลผ่านคลื่นวิทยุไปยังอุปกรณ์ปลายทาง โดยเพิ่มการส่งสัญญาณนำร่อง (Preamble Signal) ก่อนการส่งข้อมูลหรือสัญญาณผ่านคลื่นวิทยุ และเพิ่มโหมดพักการทำงานเชิงลึก (Deep Sleep Mode) สำหรับอุปกรณ์รับข้อมูลหรือสัญญาณ ซึ่งจะได้มีการอธิบายรายละเอียดในหัวข้อ 2.3 ต่อไป

2.2 การออกแบบภาคส่งและภาครับสัญญาณ

2.2.1 การออกแบบภาคส่งสัญญาณ

ภาคส่งสัญญาณถูกออกแบบแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนการรับข้อมูลจากผู้ใช้งานผ่านโปรแกรมบนคอมพิวเตอร์ และส่วนการตรวจสอบข้อมูลจากคอมพิวเตอร์และส่งข้อมูลหรือสัญญาณไปยังตัวรับสัญญาณ ซึ่งในบทความนี้ใช้คอมพิวเตอร์ที่มีติดตั้งอยู่แล้วที่ทำงานในการลงโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นเพื่อใช้งานร่วมกับอุปกรณ์รับ-ส่งสัญญาณ โดยโปรแกรมพัฒนาขึ้นจากภาษาไพทอน (Python) และได้ออกแบบหน้าจอกฎจัดวางแบบ 2 คอลัมน์ (2-Column Layout) เพื่อแยกระบบการสั่งการและระบบตรวจสอบออกจากกันอย่างชัดเจน โดยในระบบการสั่งการทำหน้าที่รับข้อมูลหรือคำสั่งจากผู้ใช้งานประกอบด้วยหมายเลขอุปกรณ์ (Receiver) หมายเลขซีเรียล (Serial Number) ที่ต้องการค้นหา และสัญลักษณ์ของไฟแสดงสถานะของอุปกรณ์รับสัญญาณ สำหรับระบบตรวจสอบมีวัตถุประสงค์เพื่อสถานะของอุปกรณ์รับสัญญาณทั้งหมดที่อยู่ในระบบซึ่งทำให้ผู้ใช้งานสามารถตรวจสอบอุปกรณ์รับที่ตนติดตั้งได้ผ่านหน้าจอโปรแกรม

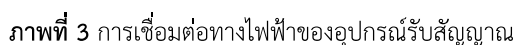
สำหรับอุปกรณ์ส่งสัญญาณที่ประกอบด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 และ โมดูล LoRa SX1278 มีการเชื่อมต่อทางไฟฟ้าดังภาพที่ 2 โดยอุปกรณ์นี้มีการเชื่อมต่อเข้ากับคอมพิวเตอร์ที่ติดตั้งโปรแกรมในการรับคำสั่งจากผู้ใช้งานโดยตรง



ภาพที่ 2 การเชื่อมต่อทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ส่งสัญญาณ

2.2.2 การออกแบบภาครับสัญญาณ

อุปกรณ์รับสัญญาณที่ประกอบด้วยอุปกรณ์หลักคือ ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32, โมดูล LoRa SX1278, โมดูลรีเลย์, หลอดแอลอีดีความสว่างสูง และ ออดสัญญาณเสียง มีการเชื่อมต่อทางไฟฟ้าดังภาพที่ 2 โดยอุปกรณ์นี้มีการเชื่อมต่อเข้ากับแบตเตอรี่ขนาด 9 โวลต์เพื่อใช้เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าในระหว่างการใช้งาน



ระบบที่นำเสนอถูกออกแบบเพื่อลดการใช้พลังงานของอุปกรณ์รับสัญญาณ โดยอาศัยคุณสมบัติการเข้าสู่โหมดพักการทำงานเชิงลึกของไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ร่วมกับกลไกตรวจจับกิจกรรมบนช่องสัญญาณ (Channel Activity Detection: CAD) ของโมดูล LoRa SX1278 ในสถานะปกติไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ฝั่งรับจะเข้าสู่โหมดพักการทำงานเชิงลึก ซึ่งมีการใช้กระแสไฟฟ้าประมาณ 0.01 mA เพื่อลดการใช้พลังงานของระบบให้ต่ำที่สุด ในขณะที่วงจรนาฬิกาเวลาจริงภายใน (Real-Time Clock: RTC) ยังคงทำงานและทำหน้าที่สร้างสัญญาณปลอกเป็นระยะตามเวลาที่กำหนด

เมื่อถึงรอบการตรวจสอบสัญญาณ RTC จะกระตุ้นหรือปลุกไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ให้กลับเข้าสู่สถานะทำงานชั่วคราว จากนั้นไมโครคอนโทรลเลอร์จะสั่งให้โมดูล LoRa SX1278 ดำเนินการตรวจจับกิจกรรมบนช่องสัญญาณด้วยโหมด CAD เพื่อค้นหาการมีอยู่ของสัญญาณ หากตรวจสอบแล้วไม่พบกิจกรรมใด ๆ บนช่องสื่อสาร ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 จะสั่งให้โมดูล LoRa กลับสู่สถานะพักการทำงาน และเข้าสู่โหมดพักการทำงานเชิงลึกอีกครั้ง ส่งผลให้ระบบมีค่ารอบการทำงาน (Duty Cycle) ต่ำและลดการสูญเสียพลังงานจากการเปิดภาครับอย่างต่อเนื่อง

ในกรณีที่อุปกรณ์ส่งสัญญาณต้องการส่งข้อมูล ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ที่ติดตั้งที่อุปกรณ์ส่งสัญญาณจะสั่งให้โมดูล LoRa SX1278 ส่งสัญญาณนำร่องที่มีความยาวประมาณ 1–2 วินาที ก่อนการส่งข้อมูลจริง เพื่อเพิ่มโอกาสให้อุปกรณ์รับสัญญาณสามารถตรวจกิจกรรมบนช่องสัญญาณระหว่างรอบการทำงานของ CAD เมื่ออุปกรณ์รับสัญญาณถูกปลุกขึ้นมาตรวจสอบช่องสัญญาณในรอบถัดไปและตรวจพบสัญญาณนำร่องดังกล่าวโมดูล LoRa SX1278 จะสลับจากโหมด CAD เข้าสู่โหมดรับข้อมูล (Receive Mode) โดยอัตโนมัติ และรอรับข้อมูลที่ถูกส่งตามมา

ภายหลังการรับข้อมูลเสร็จสมบูรณ์โมดูล LoRa SX1278 จะดำเนินการตรวจสอบความถูกต้องของที่อยู่ปลายทาง (Destination Address Verification) เพื่อยืนยันว่าข้อมูลดังกล่าวถูกส่งมายังไหนครบตามที่กำหนด หากผลการตรวจสอบถูกต้อง โมดูลจะสร้างสัญญาณดิจิทัลระดับลอจิกส่งผ่านขา DIO0 เพื่อแจ้งเหตุการณ์การรับข้อมูลสำเร็จไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์

สัญญาณจากขา DIO0 ถูกเชื่อมต่อเข้ากับขา GPIO ของไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ซึ่งกำหนดให้เป็นแหล่งสัญญาณปลุกภายนอก (External Wake-up Source) สำหรับโหมดพักการทำงานเชิงลึก เมื่อได้รับสัญญาณดังกล่าว ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 จะถูกปลุกให้กลับเข้าสู่สถานะทำงานปกติและดำเนินการประมวลผลเหตุการณ์ที่ได้รับ จากนั้น

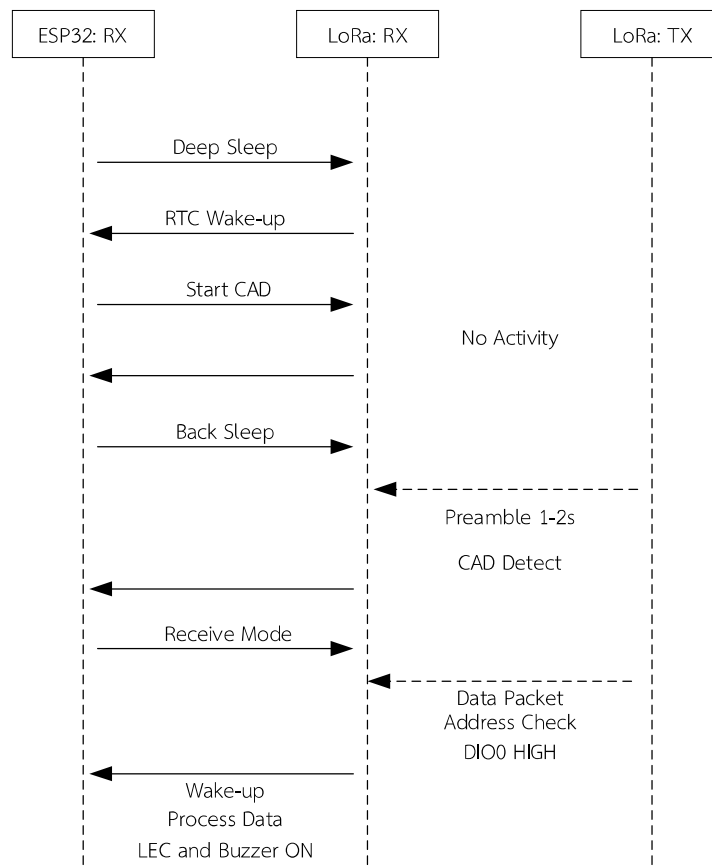
จึงส่งงานรีเลย์เพื่อควบคุมการทำงานของหลอดแอลอีดีความสว่างสูงและออกสัญญาณเสียงเพื่อแจ้งเตือนผู้ใช้งาน ซึ่งแสดงถึงระบบมีการรับข้อมูลสำเร็จและทำงานถูกต้อง ซึ่งแสดงแผนผังลำดับการทำงานดังภาพที่ 4

การประเมินการประหยัดพลังงาน (E) ที่เกิดขึ้นของระบบนี้ สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (1)

$$E = (P_{st} - P_{dm}) \cdot t_r \quad (1)$$

เมื่อ P_{st} คือ กำลังไฟฟ้าขณะอยู่โหมดรอสัญญาณแจ้งเตือน (Standby mode), วัตต์
 P_{dm} คือ กำลังไฟฟ้าขณะอยู่โหมดพักการทำงานเชิงลึก (Deep sleep mode), วัตต์
 t_r คือ เวลาที่เหลือของ 1 ชั่วโมงที่ระบบอยู่ในโหมดรอสัญญาณแจ้งเตือนหรือพักการทำงานเชิงลึก (Remaining time), ชั่วโมง

ตัวอย่างการคำนวณค่าตัวแปรในสมการที่ (1) เช่น กรณีมีการส่งสัญญาณไปยังเครื่องรับสัญญาณเพื่อระบุตำแหน่งของสินค้าจำนวน 2 ครั้ง ภายใน 1 ชั่วโมง ซึ่งมีเวลาที่ใช้ไปสำหรับแสดงสัญญาณ 5 วินาทีต่อครั้ง ดังนั้นจะเหลือเวลาสำหรับอยู่ในโหมดรอสัญญาณแจ้งเตือนหรือพักสัญญาณเชิงลึก (t_r) เท่ากับ $(3600 - (2 \cdot 5)) / 3600$ โดยความแตกต่างระหว่างกำลังไฟฟ้าขณะอยู่โหมดรอสัญญาณแจ้งเตือนและโหมดพักการทำงานเชิงลึก คือ กำลังไฟฟ้าส่วนต่างที่สามารถประหยัดได้เมื่อระบบทำงานในโหมดพักการทำงานเชิงลึกแทน



ภาพที่ 4 แผนผังลำดับการทำงานระบบประหยัดพลังงานของอุปกรณ์ระบุตำแหน่งแบบไร้สายฯ

แนวทางดังกล่าวช่วยลดการใช้พลังงานของอุปกรณ์รับสัญญาณได้ เนื่องจากภาครับไม่จำเป็นต้องเปิดทำงานตลอดเวลา แต่ยังสามารถตรวจจับและรับข้อมูลจากอุปกรณ์ส่งสัญญาณได้อย่างถูกต้องผ่านกลไกตรวจจับกิจกรรมบนช่องสัญญาณร่วมกับการส่งสัญญาณนำร่องที่มีระยะเวลายาวกว่าปกติ ส่งผลให้ระบบมีความเหมาะสมสำหรับงานเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายและอุปกรณ์ที่ใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ในระยะยาว

2.4 การทดลองและประเมินความถูกต้อง

การทดลองการทำงานของอุปกรณ์ระบุตำแหน่งแบบไร้สายด้วยเทคโนโลยี LoRa ร่วมกับระบบประหยัดพลังงาน ดำเนินการผ่านการทดสอบเลื่อนระยะอุปกรณ์รับสัญญาณให้ห่างจากตัวอุปกรณ์ส่งสัญญาณเพื่อหาระยะส่งสัญญาณที่ไกลที่สุดที่อุปกรณ์จะสามารถส่งสัญญาณถึงกันได้ โดยกำหนดให้ระยะห่างระหว่างอุปกรณ์รับและส่งในการทดลองมีระยะดังนี้ 10 เมตร, 20 เมตร, 50 เมตร, 100 เมตร และ 120 เมตร ตามลำดับ โดยในแต่ละระยะจะทำการส่งสัญญาณจากอุปกรณ์ส่งสัญญาณไปยังอุปกรณ์รับสัญญาณผ่านการส่งการบนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และทำการสังเกตการทำงานของระบบ

การประเมินความถูกต้องดำเนินการค่าความถูกต้อง (accuracy) ที่แสดงถึงค่าที่วัดได้มีค่าใกล้เคียงกับเป้าหมายเท่าใดดังสมการที่ (2) [8, 9]

$$\% Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + FN + TN + FP} \times 100 \quad (2)$$

เมื่อ TP คือ เหตุการณ์เกิดขึ้นจริง และระบบมีการทำงานจริง

FN คือ เหตุการณ์เกิดขึ้นจริง แต่ระบบไม่มีการทำงาน

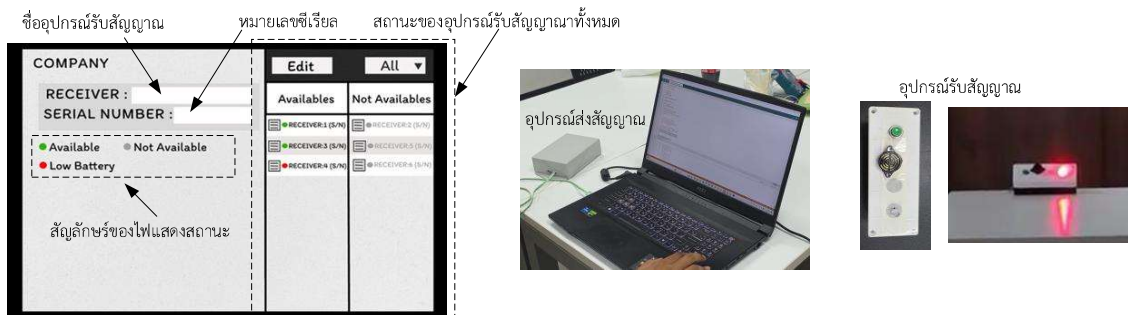
FP คือ ไม่เกิดเหตุการณ์ขึ้นจริงแต่ระบบมีการทำงาน

TN คือ ไม่เกิดเหตุการณ์ขึ้นจริง และระบบไม่มีการทำงานจริง

3. ผลการศึกษา

3.1 อุปกรณ์ระบุตำแหน่งแบบไร้สาย

อุปกรณ์ระบุตำแหน่งแบบไร้สายด้วยเทคโนโลยี LoRa ร่วมกับระบบประหยัดพลังงาน แสดงได้ดังภาพที่ 5 ซึ่งมีส่วนของโปรแกรมสำหรับรับคำสั่งจากผู้ใช้งานและตรวจสอบสถานะของอุปกรณ์รับสัญญาณที่เชื่อมต่ออยู่ในระบบ ส่วนอุปกรณ์ส่งสัญญาณตามคำสั่งของผู้ใช้งานและส่วนรับสัญญาณหรือข้อมูลเพื่อประมวลผลในการแสดงผลด้วยหลอดแอลอีดีความสว่างสูงและออกสัญญาณเสียง



ภาพที่ 5 อุปกรณ์ระบุตำแหน่งแบบไร้สายด้วยเทคโนโลยี LoRa ร่วมกับระบบประหยัดพลังงาน

3.2 ผลการทดลองและการประเมินความถูกต้อง

การทดสอบเพื่อหาระยะส่งสัญญาณที่ไกลที่สุดที่อุปกรณ์จะสามารถส่งสัญญาณถึงกันได้ โดยดำเนินการทดสอบระยะละ 20 ครั้ง ซึ่งแต่ละระยะของการทดสอบจะดำเนินการทดสอบความถูกต้องของการส่งสัญญาณควบคู่ไปด้วย แสดงดังตารางที่ 1 และ 2 ซึ่งพบว่าอุปกรณ์รับและส่งสัญญาณ สามารถสื่อสารกันได้ในระยะ 100 เมตร โดยจะทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพในระยะ 0 ถึง 50 เมตร ซึ่งสามารถมองเห็นแสงสว่างจากแอลอีดีความสว่างสูงและได้ยินเสียงแจ้งเตือนจากออกสัญญาณเตือนได้อย่างชัดเจน แต่หลังจากระยะ 50 เมตร แม้ว่าอุปกรณ์จะยังคงสื่อสารกันได้แต่การตอบสนองช้าลง และการแสดงผลผ่านสัญญาณไฟและเสียงแจ้งเตือนไม่ชัดเจน ทำให้ผู้ทดสอบไม่สามารถระบุได้ว่าอุปกรณ์รับสัญญาณได้

ตารางที่ 1 การทดสอบการทำงานอุปกรณ์ระบุตำแหน่งแบบไร้สายด้วยเทคโนโลยี LoRa ร่วมกับระบบประหยัพลังงาน

ระยะการทดสอบ (เมตร)	การตอบสนอง	เสียง	แสงสว่าง
10	✓	✓	✓
20	✓	✓	✓
50	✓	✓	✓
100	✓	×	×
120	×	×	×

ตารางที่ 2 การทดสอบความถูกต้องการทำงานของอุปกรณ์ฯ (การรับ-ส่งสัญญาณของอุปกรณ์)

ระยะการทดสอบ (เมตร)	TP	TN	FP	FN	ร้อยละความถูกต้อง
10	15	5	0	0	100
20	15	5	0	0	100
50	15	8	0	0	100
100	7	5	0	8	60
120	0	5	0	15	25

จากผลการทดสอบที่ระยะไม่เกิน 50 เมตร พบว่าระบบสามารถทำงานได้อย่างถูกต้องร้อยละ 100 โดยกรณีที่มีการสั่งให้ระบบทำงานด้วยการสั่งงานผ่านการรับคำสั่งบนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ อุปกรณ์ส่งสัญญาณจะส่งข้อมูลหรือสัญญาณไปยังอุปกรณ์รับสัญญาณและทำให้แอลอีดีความสว่างสูงและออกเสียงสัญญาณทำงานทุกครั้งของการได้รับคำสั่ง ในขณะที่กรณีที่ไม่มีคำสั่งให้ระบบทำงานนั้นระบบไม่สามารถทำงานได้เองซึ่งเป็นไปตามที่ออกแบบไว้ แต่เมื่อระยะทางระหว่างอุปกรณ์มากกว่า 50 เมตรค่าร้อยละความถูกต้องจะน้อยกว่า 100 โดยมีการตอบสนองของอุปกรณ์ส่งและรับสัญญาณ แต่แอลอีดีความสว่างสูงและออกเสียงสัญญาณทำงานไม่เต็มประสิทธิภาพกล่าวคือ แสงที่ได้ไม่สว่างเท่าปกติและเสียงที่ได้ยินเบาลง ถึงแม้ว่าอุปกรณ์จะส่งสัญญาณได้ปกติแต่การแสดงผลแจ้งเตือนผ่านแสงและเสียงไม่สามารถแสดงผลได้ตามปกติจะเป็นผลให้การระบุตำแหน่งเกิดความผิดพลาดขึ้นได้ จนกระทั่งที่ระยะ 120 เมตร อุปกรณ์ส่งและรับสัญญาณไม่สามารถส่งสัญญาณถึงกันได้

การประเมินการประหยัพลังงานจากแนวคิดที่ออกแบบไว้ข้างต้น พบว่า ในขณะที่อุปกรณ์รับสัญญาณอยู่ในโหมดพักการทำงานเชิงลึกอุปกรณ์ใช้กระแสไฟฟ้าเพียง 0.01 mA จากเดิมที่ขณะอยู่ในโหมดรอการทำงานปกติเพื่อรอรับสัญญาณในการแจ้งเตือนผ่านแสงและเสียงใช้กระแสไฟฟ้าประมาณ 390 mA นั่น คือ การใช้กลไกหรือกระบวนการโหมดพักการทำงานเชิงลึกของไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ร่วมกับการตรวจจับกิจกรรมบนช่องสัญญาณ (Channel Activity Detection: CAD) ของโมดูล LoRa SX1278 ช่วยประหยัการใช้กระแสไฟฟ้าได้ถึง 389.99 mA คิดเป็นร้อยละ 99.997 ถ้าพิจารณาพลังงานที่

ประหยัดได้ใน 1 ชั่วโมงจากแหล่งจ่ายแบตเตอรี่ 9 โวลต์โดยไม่มีการส่งสัญญาณหรือข้อมูลเพื่อค้นหาอุปกรณ์รับสัญญาณคิดเป็น 3.50991 Wh แต่ถ้ามีการส่งสัญญาณไปยังเครื่องรับสัญญาณเพื่อระบุตำแหน่งของสินค้าจำนวน 1 – 5 ครั้งภายในเวลา 1 ชั่วโมง โดยแต่ละครั้งแสงและเสียงมีการแจ้งเตือนเป็นเวลา 5 วินาที ทำให้สามารถประหยัดพลังงานได้ระหว่าง 3.50504 – 3.48554 Wh

4. บทสรุป

บทความนี้นำเสนอการออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์ระบุตำแหน่งแบบไร้สายด้วยเทคโนโลยี LoRa ร่วมกับระบบประหยัดพลังงาน โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 และโมดูล LoRa SX1278 เป็นองค์ประกอบหลักของระบบ อุปกรณ์ถูกออกแบบให้สามารถระบุตำแหน่งของอุปกรณ์ปลายทางผ่านการแจ้งเตือนด้วยแสงจากหลอดแอลอีดีความสว่างสูงและเสียงจากฮอตสัญญาณ โดยอาศัยการกำหนดรหัสประจำตัวของอุปกรณ์รับสัญญาณเพื่อให้สามารถเลือกค้นหาอุปกรณ์ที่ต้องการได้อย่างถูกต้อง

ระบบประหยัดพลังงานถูกพัฒนาขึ้นโดยประยุกต์ใช้โหมดพักการทำงานเชิงลึก (Deep Sleep Mode) ของ ESP32 ร่วมกับเทคนิค Channel Activity Detection (CAD) ของโมดูล LoRa ทำให้อุปกรณ์รับสัญญาณสามารถลดการใช้พลังงานในช่วงเวลาที่ไม่มีการใช้งานได้ซึ่งใช้กระแสไฟฟ้าเพียง 0.01 mA ในโหมดพักการทำงาน เมื่อเปรียบเทียบกับกระแสไฟฟ้า 390 mA ในโหมดการทำงานปกติ คิดเป็นการลดการใช้พลังงานได้ร้อยละ 99.997

ผลการทดลองพบว่าระบบสามารถสื่อสารและแสดงผลการแจ้งเตือนได้อย่างมีประสิทธิภาพในระยะไม่เกิน 50 เมตร โดยมีค่าความถูกต้องร้อยละ 100 และในขณะที่ระยะ 100 เมตรระบบยังคงสามารถสื่อสารได้ด้วยค่าความถูกต้องร้อยละ 60 และ ประสิทธิภาพของการแจ้งเตือนผ่านแสงและเสียงจะลดลงเมื่อระยะทางเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ที่ระยะ 120 เมตร ระบบ จะไม่สามารถสื่อสารได้ ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานสำหรับการค้นหาและระบุตำแหน่งอุปกรณ์ ช่วยลดระยะเวลาในการค้นหา เพิ่มประสิทธิภาพการบริหารจัดการทรัพยากร และยืดอายุการใช้งานของอุปกรณ์ที่ใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ได้อย่างเหมาะสม

5. เอกสารอ้างอิง (References)

- [1] National Broadcasting and Telecommunications Commission (NBTC). (2020). Frequency bands permitted for general use (2nd ed.). Bangkok, Thailand: National Broadcasting and Telecommunications Commission. Retrieved from <https://www.nbt.go.th>
- [2] Semtech Corporation, "SX1276/77/78/79 – 137 MHz to 1020 MHz, Low Power Long Range Transceiver Datasheet," Semtech Corp., Camarillo, CA, USA, 2015.
- [3] F. Zafari, A. Gkelias, and K. K. Leung, "A Survey of Indoor Localization Systems and Technologies," IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 21, no. 3, pp. 2568–2599, Third Quarter, 2019.
- [4] U. Raza, P. Kulkarni, and M. Sooriyabandara, "Low Power Wide Area Networks: An Overview," IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 19, no. 2, pp. 855–873, Second Quarter, 2017.
- [5] Y. Fargas and M. N. Petersen, "GPS-Free Geolocation Using LoRa in Low-Power WANs," in Proc. Global Internet of Things Summit (GloTS), Geneva, Switzerland, Jun. 2017, pp. 1–6
- [6] J. Petajajarvi, K. Mikhaylov, A. Roivainen, T. Hänninen, and M. Pettissalo, "On the Coverage of LPWANs: Range Evaluation and Channel Attenuation Model for LoRa Technology," in Proc. 14th Int. Conf. Intelligent Transport Systems Telecommunications (ITST), Warsaw, Poland, Nov. 2017, pp. 55–59.



- [7] T. L. H. Do, "Sleep Modes and Power Consumption of an XBee," Bachelor's Thesis, Degree Programme in Electronics, Theseus University of Applied Sciences, 2022.
- [8] Somjai Wangsuphachart, Research Design & Research Methodology. Retrieved 29 October 2018, from <http://www.cai.md.chula.ac.th/lesson/research/re7.htm>.
- [9] A. Khummueng and N. Chaiyabut, "Development of an Automated System for Beverage Preparation to Assist Bartenders," Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi Academic Journal, vol. 13, no. 2, pp. 237–253, Jul.–Dec. 2025.