

การพัฒนาระบบตรวจจับการสูญเสียพลังงานด้วยเทคโนโลยี LoRaWAN ภายในอาคารสถานศึกษา

Development of an Energy Loss Detection System using LoRaWAN Technology in an Educational Building

จันทิมา ลาภสงผล¹

Chantima Lapsongphon¹

¹ภาควิชาเทคโนโลยี วิทยาลัยพัฒนาชุมชนเมือง มหาวิทยาลัยนวมินทราธิราช

¹Department of Technology, Urban Community Development College,

Navamindradhiraj University

Received: October 29, 2025

Revised: January 2, 2026

Accepted: January 6, 2026

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอระบบการตรวจจับการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าของอาคารในพื้นที่เป็นรายห้อง โดยมุ่งเน้นการระบุและแจ้งเตือนความผิดปกติจากโหลดสแตนด์บาย (Standby Load) ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญของการสูญเสียพลังงานที่มักถูกมองข้าม ระบบที่พัฒนาขึ้นใช้การบูรณาการเทคโนโลยี LoRaWAN ร่วมกับเว็บแอปพลิเคชัน ThingsBoard เพื่อการรับ-ส่งข้อมูลระยะไกลในอาคารผ่านรูปแบบการเชื่อมต่อแบบไร้สาย โดยทำการศึกษาผ่านตัวแทนห้องบรรยายหลักจำนวน 1 ห้อง ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่า ระบบมีความแม่นยำสูง สามารถวัดค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าได้โดยมีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน $\pm 3\%$ และมีสมรรถนะในการสื่อสารที่สามารถรับ-ส่งข้อมูลได้อย่างเสถียรแม้ในสภาพแวดล้อมของอาคารที่มีสัญญาณรบกวนสูง โดยมีค่าความแรงของสัญญาณ (RSSI) เฉลี่ย -61.01 เดซิเบลมิลลิวัตต์ และค่าอัตราส่วนสัญญาณที่ได้รับต่อสัญญาณรบกวน (SNR) เฉลี่ย 14.70 เดซิเบล จุดเด่นที่สำคัญ คือ ระบบสามารถตรวจพบการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าซึ่งมีสาเหตุหลักมาจากโหมดสแตนด์บายของอุปกรณ์ไฟฟ้าได้อย่างแม่นยำ และเมื่อทดลองใช้งานเป็นระยะเวลา 4 สัปดาห์ ระบบดังกล่าวมีส่วนสนับสนุนให้สามารถลดการสูญเสียพลังงานได้ $7,977.73$ วัตต์ชั่วโมง หรือคิดเป็น 98.63% เมื่อเทียบกับก่อนการติดตั้ง

คำสำคัญ: เทคโนโลยีลอราแวน การตรวจติดตามพลังงาน เว็บแอปพลิเคชัน

Abstract

This research presents a room-level electrical energy loss detection system for buildings, focusing specifically on identifying and alerting anomalies caused by standby loads, which are a significant yet often overlooked source of energy waste. The developed system integrates LoRaWAN technology with the ThingsBoard web application to enable wireless long-range data transmission within a building. The study was conducted in a main lecture room, which served as the representative case study. The results demonstrate that the system achieves high accuracy, with voltage and current measurement errors not exceeding $\pm 3\%$. It also exhibits stable communication performance in building environments with high signal interference, achieving an average Received Signal Strength Indicator: RSSI of -61.01 dBm and an average Signal-to-Noise Ratio: SNR of 14.70 dB. A key feature of the system is its ability to accurately detect energy losses primarily associated with the standby mode of electrical appliances. During a four-week implementation period, the system reduced energy loss by $7,977.73$ Wh, representing a 98.63% reduction compared with the pre-installation level.

Keywords: LoRaWAN technology, energy monitoring, web application



บทนำ

ปัจจุบันระบบตรวจติดตามการใช้พลังงาน (energy monitoring system) มีบทบาทสำคัญต่อการบริหารจัดการพลังงานของอาคารเป็นอย่างมาก หลักการของการตรวจติดตามการใช้พลังงานนั้นจะมุ่งเน้นไปที่การบันทึกข้อมูลการใช้พลังงานของอาคาร เพื่อให้ทราบถึงปริมาณและพฤติกรรมการใช้พลังงานไฟฟ้าของระบบต่าง ๆ ภายในอาคาร และสามารถนำข้อมูลเหล่านี้ไปวิเคราะห์เพื่อประเมินประสิทธิภาพการใช้พลังงาน รวมถึงใช้เป็นข้อมูลประกอบการกำหนดมาตรการอนุรักษ์พลังงาน (Turner & Doty, 2006) ทั้งนี้ อาคารโดยทั่วไปมีส่วนการใช้พลังงานไฟฟ้าส่วนใหญ่อยู่ในระบบปรับอากาศประมาณร้อยละ 65 รองลงมาได้แก่ระบบไฟฟ้าแสงสว่างประมาณร้อยละ 25 และระบบอื่น ๆ ร้อยละ 10 ตามลำดับ (Termsawasd & Chaiyakul, 2024) ซึ่งการตรวจติดตามการใช้พลังงานในปัจจุบันนี้จะอาศัยเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (Internet of Things: IoT) เข้ามามีส่วนช่วยในการติดตามการใช้พลังงานมากขึ้น โดยเชื่อมต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าหรือระบบต่าง ๆ เข้ากับเครือข่ายอินเทอร์เน็ต ทำให้สามารถตรวจวัด ติดตามการใช้พลังงาน

รวมถึงควบคุมอุปกรณ์หรือระบบนั้นได้อย่างอัตโนมัติแบบเรียลไทม์ (real time) (Smith & Parmenter, 2016) ซึ่งการประยุกต์ใช้เทคโนโลยี IoT ในการตรวจติดตามการใช้พลังงานนั้นสามารถดำเนินการได้ทั้งรูปแบบการสื่อสารแบบใช้สาย (wired) และแบบไร้สาย (wireless) (Goh & Chua, 2024; Salam et al., 2024) โดยที่รูปแบบไร้สายนั้นจะได้รับความนิยมสูงในการประยุกต์ใช้กับการตรวจติดตามการใช้พลังงาน โดยเฉพาะเทคโนโลยี LPWAN: Low Power Wide Area Network กลุ่มแบบยกเว้นใบอนุญาตที่เรียกว่า LoRa (Long Range) ตามข้อมูลผลการเปรียบเทียบคุณสมบัติของเทคโนโลยีการสื่อสารแบบไร้สายดังภาพ 1 เนื่องจากจุดเด่นในด้านการส่งข้อมูลได้ระยะทางไกล มีการใช้พลังงานและต้นทุนต่ำ อีกทั้งสามารถใช้งานบนความถี่สาธารณะที่ได้รับการจัดสรรจาก กสทช. โดยไม่ต้องขอใบอนุญาต (Khunboa, 2019) ซึ่งเหมาะกับการนำมาตรวจติดตามค่าพลังงานที่ต้องการความสะดวก คล่องตัว ช่วยลดระยะเวลาในการติดตั้ง และสามารถรองรับอุปกรณ์ได้เป็นจำนวนมาก (Santos & Ferreira, 2019) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา โดยสามารถจัดกลุ่มงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้เทคโนโลยี LoRa ในการตรวจติดตามพลังงานได้เป็น 3 กลุ่มหลัก ดังแสดงข้อมูลในตาราง 1

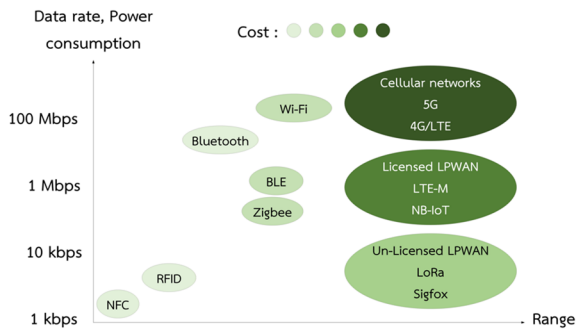
อย่างไรก็ตาม จากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า งานวิจัยส่วนใหญ่ยังคงมุ่งเน้นไปที่การตรวจวัดค่าพลังงานไฟฟ้าในภาพรวมของอาคารเป็นหลัก ซึ่งแม้จะสามารถสะท้อนแนวโน้มและปริมาณการใช้พลังงานรวมได้ แต่ยังมีข้อจำกัดในการระบุแหล่งที่มาของการใช้พลังงานไฟฟ้าใน

ระดับพื้นที่ย่อยหรือพื้นที่ใช้งานเฉพาะ เช่น ระดับชั้นหรือระดับห้อง รวมถึงไม่ได้ให้ความสำคัญกับการใช้พลังงานของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในอาคาร ส่งผลให้ไม่สามารถวิเคราะห์สาเหตุเชิงลึกของการสูญเสียพลังงานหรือกำหนดมาตรการแก้ไขได้อย่างตรงจุด

ตาราง 1

การทบทวนวรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตรวจติดตามพลังงานด้วยเทคโนโลยี LoRaWAN

กลุ่มงานวิจัย	ผู้เขียน	บทสรุปงานวิจัย	ข้อจำกัด/ช่องว่างการวิจัย
ด้านการตรวจติดตามพลังงานในอาคารขนาดใหญ่หรืออาคารหลายชั้น	Kanadee and Chaimool (2024)	พัฒนาและทดสอบระบบ LoRaWAN สำหรับตรวจติดตามพลังงานในอาคาร 8 ชั้น โดยติดตั้ง Smart Meter ทุกชั้น ผลพบว่า สามารถส่งข้อมูลสำเร็จมากกว่า 80% และสัญญาณครอบคลุมทั่วพื้นที่อาคาร	มุ่งเน้นประเมินสมรรถนะเครือข่ายเป็นหลัก ยังขาดการวิเคราะห์การสูญเสียพลังงานในระดับพื้นที่ใช้งาน
	Thirunavukkarasu and Raju (2025)	นำเสนอระบบอาคารอัจฉริยะสำหรับสถาบันการศึกษา โดยใช้ STM32 ไมโครคอนโทรลเลอร์ LoRaWAN และ TTN ร่วมกับอัลกอริทึม DQN เพื่อวิเคราะห์การใช้พลังงานแบบอัตโนมัติ สามารถลดการใช้พลังงานรวมของอาคารได้ร้อยละ 23 ภายใน 6 เดือน	มุ่งเน้นการวิเคราะห์รูปแบบการใช้พลังงานแบบอัตโนมัติ สำหรับปรับปรุงการใช้พลังงานโดยรวม
	Al-Sammak et al. (2025)	เปรียบเทียบ LoRaWAN และ NB-IoT ในด้านประสิทธิภาพและลดการส่งข้อมูลที่ไม่จำเป็น โดยระบบจะลดการส่งข้อมูลเมื่อค่าพลังงานคงที่สามารถลดจำนวนแพ็กเกจข้อมูลได้ 76.11% (NB-IoT) และ 86.81% (LoRaWAN) ส่งผลให้ยืดอายุการใช้งานแบตเตอรี่ของอุปกรณ์ IoT	เน้นการทดสอบในสภาวะควบคุมและเปรียบเทียบโปรโตคอล ยังขาดการวิเคราะห์การสูญเสียพลังงานในระดับพื้นที่ใช้งาน และไม่ได้ทดสอบในสภาวะที่มีสัญญาณรบกวนสูง (interference)
ด้านการตรวจติดตามพลังงานในพื้นที่ขนาดใหญ่หรือพื้นที่กระจายตัว	Jain et al. (2018)	พัฒนาอุปกรณ์ IoT วัดค่าไฟฟ้า (V, I, f, PF) และคำนวณค่าใช้จ่ายรายวันในพื้นที่ชนบทไทยผ่านระบบคลาวด์	ยังไม่มีกรออกแบบกลไกการแจ้งเตือนแบบเรียลไทม์ และการตรวจจับการสูญเสียพลังงานในระดับห้อง
	Ramadhan et al. (2021)	พัฒนาระบบ IoT ติดตามไฟฟ้าในมหาวิทยาลัยด้วย LoRa-WAN ผลการทดสอบพบว่าระบบสามารถติดตามและรวบรวมข้อมูลแบบ Real-time ได้แม่นยำ	เป็นการควบคุมการใช้พลังงานโดยจัดตั้งเวลาการทำงานของอุปกรณ์ (scheduling) ให้สอดคล้องกับพฤติกรรมของผู้ใช้งาน
ด้านการตรวจวัดพลังงานในพื้นที่อยู่อาศัยหรือโรงงานขนาดเล็ก	Guevara et al. (2022)	นำเสนอระบบตรวจวัดพลังงานไฟฟ้าต้นทุนต่ำโดยใช้ ESP32 ร่วมกับเทคโนโลยี LoRa สำหรับอาคารที่อยู่อาศัยหรือโรงงานขนาดเล็ก รองรับการใช้ระบบไฟฟ้าแบบ 1 เฟสและ 3 เฟส เพื่อวิเคราะห์รูปแบบการใช้พลังงาน	ระบบยังมีข้อจำกัดด้านการรองรับจำนวนโหนดจำนวนมาก



ภาพ 1 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของเทคโนโลยีการสื่อสารแบบไร้สาย

Note. Adapted from “A survey and bibliometric analysis of different communication technologies available for smart meters,” by A. Hassan, H. Afrouzi, C. Siang, J. Ahmed, K. Mehranzamir, & C. L. Wooi, 2022, *Cleaner Engineering and Technology*, 7, 100424. Copyright 2022 by Elsevier.

ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะพัฒนาระบบตรวจวัดการสูญเสียพลังงานในระดับพื้นที่ย่อย (รายห้อง) เพื่อเติมเต็มช่องว่างที่สำคัญในการติดตามการใช้พลังงาน โดยระบบสามารถติดตามการใช้พลังงาน แสดงสถานะค่าพลังงาน และแจ้งเตือนเมื่อพบการใช้พลังงานที่ผิดปกติ ทั้งนี้ระบบดังกล่าวประกอบไปด้วยชุดตรวจวัดค่าทางไฟฟ้า (power monitoring node) ที่ติดตั้งโมดูลการสื่อสารไร้สาย LoRa ไว้ภายใน และระบบแสดงผลข้อมูลบนเว็บแอปพลิเคชันในรูปแบบแดชบอร์ด ทั้งนี้ ได้เลือกห้องบรรยายของอาคารสถานศึกษาเป็นพื้นที่ทดสอบระบบดังกล่าว ซึ่งระบบการตรวจวัดการสูญเสียพลังงานนี้จะมีส่วนสำคัญที่ช่วยให้เกิดการรับรู้และตระหนักถึงการสูญเสียพลังงานโดยเปล่าประโยชน์ การตรวจวัดพลังงานในระดับพื้นที่ย่อยจะช่วยให้สามารถระบุสาเหตุของปัญหาและดำเนินการแก้ไขที่ต้นเหตุ ได้อย่างเฉพาะเจาะจงและทันทั่วทั้งที่ ส่งผลให้การบริหารจัดการพลังงานในอาคารมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น ไม่เพียงแต่เป็นการลดค่าใช้จ่าย แต่ยังเป็นส่วนสำคัญที่จะส่งเสริมให้การใช้พลังงานในอาคารมีความคุ้มค่าและเกิดความยั่งยืนได้ในระยะยาว

วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อออกแบบและพัฒนาระบบตรวจวัดการสูญเสียพลังงานของอาคารในระดับพื้นที่ย่อย (รายห้อง) สำหรับบันทึกค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าและแจ้งเตือนเมื่อมีการใช้พลังงานที่ผิดปกติตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้
2. เพื่อประเมินสมรรถนะของการสื่อสารด้วยเทคโนโลยี LoRaWAN สำหรับการรับ-ส่งข้อมูลทางไฟฟ้าของระบบตรวจวัดการสูญเสียพลังงานที่ติดตั้งภายในอาคารสถานศึกษา

แนวคิดทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

1. ความคลาดเคลื่อน (error)

สำหรับการตรวจวัดข้อมูลด้านพลังงานของเครื่องจักรและอุปกรณ์นั้น สิ่งที่สำคัญประการหนึ่ง คือ ความถูกต้องแม่นยำของข้อมูลที่อ่านได้จากเครื่องวัดต่าง ๆ ดังนั้นจึงควรให้ความสำคัญในประเด็นด้านความแม่นยำ (accuracy) และความเที่ยงตรงของการตรวจวัด (precision) ของการตรวจวัด ซึ่งแนวทางการประเมินค่าความถูกต้องแม่นยำของข้อมูลนั้นจะใช้หลักการหาค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (error) (Nunak & Suesat, 2012) โดยความคลาดเคลื่อนจะหมายถึง ผลต่างระหว่างค่าที่วัดได้และค่าที่แท้จริง ดังสมการ (1)

$$\%Error = \left| \frac{X_t - X_m}{X_t} \right| \times 100\% \quad (1)$$

โดย เมื่อ X_t คือ ค่าจริง

X_m คือ ค่าที่วัดได้

2. หลักการทำงานของเทคโนโลยี LoRaWAN

LoRaWAN (Long-Range Wide-Area Network) ถือเป็นเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในงานด้าน IoT โดยอาศัยโปรโตคอล LoRa ในการรับ-ส่งข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ปลายทาง (end device)

และเกตเวย์ (gateway) ภายใต้โครงข่ายที่สามารถรองรับการเชื่อมต่ออุปกรณ์จำนวนมากได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Sornin et al., 2015) โดย LoRaWAN รองรับการใช้สื่อสาร 3 รูปแบบ ได้แก่ Class A Class B และ Class C ซึ่งมีความแตกต่างกันในด้านรูปแบบการรับ-ส่งข้อมูลและการใช้พลังงาน โดย Class A มีการใช้พลังงานต่ำที่สุดแต่มีข้อจำกัดด้านช่วงเวลาการสื่อสารรับ-ส่งข้อมูล ในขณะที่ Class C สามารถรับ-ส่งข้อมูลจากเกตเวย์ได้ตลอดเวลา (continuous) โดยจะมีความหน่วงในการรับข้อมูลต่ำที่สุด (low latency) แต่แลกมาด้วยการใช้พลังงานที่สูงกว่ารูปแบบอื่น (Semtech Corporation, 2024) ในประเทศไทยการสื่อสาร LoRa จะใช้ย่านความถี่ 920-925 MHz ซึ่งเป็นย่านความถี่ที่ไม่ต้องขอใบอนุญาต (unlicensed band) ตามที่กำหนดโดยคณะกรรมการกิจการกระจายเสียงและโทรคมนาคมแห่งชาติ (กสทช.) (National Broadcasting and Telecommunications Commission [NBTC], 2017) โดยทั่วไปองค์ประกอบของโครงข่าย LoRaWAN ประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก ได้แก่

อุปกรณ์ปลายทาง (end device)

อุปกรณ์ปลายทางเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ตรวจจับสภาวะการทำงานหรือการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อม รวมถึง การตอบสนองต่อเหตุการณ์ต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น โดยทั่วไปอุปกรณ์ประเภทนี้มักเป็นเซ็นเซอร์ (sensor) หรือแอคชูเอเตอร์ (actuator) และมาพร้อมโมดูลสื่อสารไร้สายที่รองรับมาตรฐานโปรโตคอล LoRa สำหรับการส่งข้อมูลไปยังเกตเวย์ (Sinha et al., 2017)

เกตเวย์ (Gateway)

เกตเวย์ (gateway) ทำหน้าที่เป็นตัวกลางสำหรับรับและส่งชุดข้อมูล (payload) ระหว่างอุปกรณ์ปลายทางกับลอว์แวนเน็ตเวิร์กเซิร์ฟเวอร์ (LoRaWAN Network Server: LNS) โดยรับข้อมูลผ่านคลื่นความถี่วิทยุ (RF) ที่มอดูเลตด้วยโปรโตคอล LoRa และส่งต่อข้อมูลดังกล่าวไปยังลอว์แวนเน็ตเวิร์กเซิร์ฟเวอร์ ผ่านช่องทางการสื่อสารต่าง ๆ เช่น WiFi, 4G, Ethernet หรือ LTE-M โดยไม่แก้ไขหรือดัดแปลงชุดข้อมูล (Montagny, 2022) ในโครงข่าย LoRaWAN สามารถติดตั้งเกตเวย์ได้หลายตัวภายในพื้นที่เดียวกัน ซึ่งทำให้สามารถรับข้อมูลได้พร้อมกัน คุณสมบัตินี้ช่วยเพิ่มระดับความเชื่อถือและลดโอกาสสูญหายของข้อมูล

ลอว์แวนเน็ตเวิร์กเซิร์ฟเวอร์ (LoRaWAN network server)

ลอว์แวนเน็ตเวิร์กเซิร์ฟเวอร์เปรียบเสมือนศูนย์กลางในการจัดการข้อมูลและควบคุมการสื่อสาร ให้เป็นไปอย่างปลอดภัยและมีประสิทธิภาพ ประกอบด้วย 2 ส่วนสำคัญ คือ เน็ตเวิร์กเซิร์ฟเวอร์ (Network server) และแอปพลิเคชันเซิร์ฟเวอร์ (Application Server) (Bin et al., 2024) โดยเน็ตเวิร์กเซิร์ฟเวอร์จะทำหน้าที่ประมวลผลข้อมูลและปรับแต่งประสิทธิภาพของการรับ-ส่งข้อมูลผ่านกลไกแบบ Adaptive Data Rate: ADR ซึ่งมีหน้าที่ควบคุมและปรับค่าแฟกเตอร์การกระจาย (Spreading Factor: SF) ให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมของสัญญาณจริงโดยอัตโนมัติ ในขณะที่แอปพลิเคชันเซิร์ฟเวอร์จะรับข้อมูลที่ผ่านการตรวจสอบ เพื่อนำไปใช้ในกระบวนการแสดงผลการวิเคราะห์ข้อมูลหรือการประมวลผลต่อไป

3. สมรรถนะของการสื่อสารไร้สายโครงข่าย LoRaWAN

หัวข้อนี้จะกล่าวถึงตัวแปรที่มีความสำคัญที่มีผลต่อคุณภาพสัญญาณและความสามารถในการรับ-ส่งสัญญาณของการสื่อสารแบบไร้สายโครงข่าย LoRaWAN โดยมีพารามิเตอร์หลักที่สำคัญดังต่อไปนี้

ความแรงของสัญญาณ (Received Signal Strength Indicator: RSSI)

ความแรงของสัญญาณเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อความสามารถในการรับ-ส่งข้อมูลของ LoRaWAN โดยค่า RSSI ใช้ระบุระดับกำลังสัญญาณที่อุปกรณ์ปลายทางหรือเกตเวย์สามารถรับได้ ซึ่งโดยทั่วไปจะมีค่าเป็นลบ และมีหน่วยเป็นเดซิเบลมิลลิวัตต์ ทั้งนี้ หากค่า RSSI ที่วัดได้มีค่าเข้าใกล้ศูนย์มากขึ้น แสดงถึงคุณภาพการรับสัญญาณที่ดีขึ้น (Rahman et al., 2018) ค่า RSSI สามารถคำนวณได้จากสมการ (2)

$$RSSI = -(10n \log_{10} d - A) \quad (2)$$

โดยที่ n คือ การสูญเสียของสภาพแวดล้อม

d คือ ระยะห่างระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับ

A คือ ความแรงของสัญญาณที่ได้รับในระยะทาง

1 เมตร ตามลำดับ

ค่าอัตราส่วนสัญญาณที่ได้รับต่อสัญญาณรบกวน (Signal to Noise Ratio: SNR)

เป็นตัวชี้วัดที่ใช้ประเมินคุณภาพของสัญญาณ โดยพิจารณาเปรียบเทียบกับกำลังสัญญาณที่ได้รับกับระดับสัญญาณรบกวนในช่องสัญญาณ ซึ่งมีหน่วยเป็นเดซิเบล ค่า SNR ที่มีค่าเป็นบวกหรือมากกว่าศูนย์ แสดงว่าสัญญาณที่ต้องการมีความเด่นชัดกว่าสัญญาณรบกวน และเอื้อต่อการรับข้อมูลที่ถูกต้อง โดยสามารถคำนวณได้ดังสมการ (3)

$$SNR = P_x - N \quad (3)$$

โดยที่ P_x คือ กำลังส่งของตัวส่งสัญญาณ (เดซิเบลมิลลิวัตต์)
 N คือ ระดับสัญญาณรบกวน ซึ่งสามารถคำนวณจาก (4)

$$N = -174 + 10\log_{10} BW + NF \quad (4)$$

โดยที่ BW คือ ความกว้างของคลื่นความถี่ (เฮิรตซ์)

NF คือ ตัวเลขที่ใช้ระบุค่าของสัญญาณรบกวนของเครื่องรับ (เดซิเบล)

จะเห็นได้ว่าความกว้างของคลื่นความถี่และคุณลักษณะของตัวรับมีผลโดยตรงต่อค่า SNR ของระบบ

ค่าอัตราเร็วของการส่งข้อมูล (data rate)

อัตราเร็วของการส่งข้อมูลในการสื่อสารแบบ LoRa ขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์หลัก ได้แก่ แพลตฟอร์มการกระจาย (Spreading Factor: SF) ความกว้างของคลื่นความถี่ (BW) และอัตราการเข้ารหัส (Coding Rate: CR) โดยค่า SF แสดงถึงจำนวนบิตต่อหนึ่งสัญลักษณ์ และมีค่าตั้งแต่ 7 ถึง 12 ซึ่งค่า SF ที่สูงจะช่วยเพิ่มระยะทางในการสื่อสาร แต่จะทำให้อัตราเร็วของการส่งข้อมูลลดลง (Khunboa, 2023)

$$R_b = SF \times \frac{BW}{2^{SF}} \times \left(\frac{4}{4 + CR} \right) \quad (5)$$

โดยที่ R_b คือ อัตราเร็วในการส่งข้อมูล (บิตต่อวินาที)

SF คือ แพลตฟอร์มการกระจาย

BW คือ ความกว้างของคลื่นความถี่ (เฮิรตซ์)

CR คือ อัตราการเข้ารหัสของข้อมูลเพื่อตรวจสอบ และจัดการความผิดพลาดของข้อมูลในขณะที่กำลังส่งสัญญาณมีค่า 1 ถึง 4

อย่างไรก็ตาม ซึ่งค่าสมรรถนะต่าง ๆ นี้จะสัมพันธ์กับสภาพแวดล้อม การติดตั้ง ตำแหน่งของอุปกรณ์ปลายทางและเกตเวย์ ตามลำดับ โดยอุปกรณ์ปลายทางจะมีผลต่อความแรงและความชัดเจนของสัญญาณต้นทาง อันเนื่องมาจากกำหนดระดับความแรง (transmit power) ของสัญญาณ LoRa คุณภาพของเสาอากาศที่ใช้ส่งข้อมูล รวมถึงระยะทาง เป็นต้น ในขณะที่ตำแหน่งหรือจำนวนของเกตเวย์นั้นจะมีผลต่อการรับสัญญาณเป็นหลัก

วิธีการดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้สามารถแบ่งวิธีการดำเนินงานวิจัยออกเป็น 4 ส่วนหลัก ดังนี้

1. การสำรวจค่าทางไฟฟ้าในพื้นที่ทดสอบ

ในการสำรวจค่าทางไฟฟ้าของพื้นที่ทดสอบ ได้กำหนดให้ห้องบรรยาย TWP409 จำนวน 1 ห้องของอาคารเป็นตัวแทนการศึกษา (case study) เนื่องจากเป็นพื้นที่ใช้งานหลักของอาคารในการทำกิจกรรมการเรียนการสอน และกิจกรรมสนับสนุนอื่น ๆ มีรูปแบบการใช้งานที่สม่ำเสมอ ในช่วงเวลา 9.00–12.00 น. และ 13.00–17.00 น. โดยห้องบรรยายในอาคารจะถูกออกแบบให้มิงจรไฟฟ้าหลัก 3 ประเภท ได้แก่ วงจรไฟแสงสว่าง วงจรเครื่องปรับอากาศ (Fan Coil Unit: FCU) และวงจรเต้ารับไฟฟ้า ตามลำดับ วงจรไฟแสงสว่าง (lighting) จะประกอบด้วยหลอดไฟแอลอีดีขนาด 40 วัตต์ จำนวน 21 หลอด วงจรเครื่องปรับอากาศ ประกอบด้วยเครื่องส่งลมเย็นขนาด 186 วัตต์ จำนวน 3 เครื่องต่อหนึ่งวงจร รวม 2 วงจร ส่วนวงจรเต้ารับไฟฟ้า (outlet) รองรับอุปกรณ์ไฟฟ้าประจำห้อง ได้แก่ อุปกรณ์คอมพิวเตอร์ 1 เครื่อง (65 วัตต์) โปรเจคเตอร์ 1 เครื่อง (254 วัตต์) เครื่องขยายเสียง 1 ชุด (72 วัตต์) และโทรทัศน์ 2 เครื่อง (160 วัตต์ต่อเครื่อง) ซึ่งอุปกรณ์ไฟฟ้าดังกล่าวนี้รองรับการใช้งานกับระบบไฟฟ้ากระแสสลับแรงดัน 230 โวลต์ โดยวงจรทั้งหมดจะติดตั้งภายในตู้แผงควบคุม (Distribution Board: DB) ประจำชั้น ที่ตั้งอยู่ในห้องไฟฟ้า (electrical room) ของอาคาร และเมื่อสำรวจและตรวจวัดค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของอุปกรณ์ไฟฟ้าภายในห้องเป็นรายชั่วโมงตามช่วงเวลาการใช้งานจริง ผลการสำรวจดังตาราง 2 พบว่า ค่ากระแสไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงตามกิจกรรมที่เกิดขึ้น โดยมีค่าเป็นศูนย์

เมื่อไม่มีการใช้งาน อย่างไรก็ตาม ค่ากระแสไฟฟ้าของวงจร
 ใต้รับไฟฟ้าในบางช่วงจะมีค่า 0.26 และ 0.21 แอมแปร์
 เมื่อตรวจสอบพบว่า เกิดจากการลิมิตสวิตช์ไฟของปลั๊ก
 พ่วงไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับอุปกรณ์ไฟฟ้าภายในห้อง ส่งผลให้
 เกิดการใช้พลังงานในโหมดสแตนด์บาย (standby power
 mode) ซึ่งคิดเป็นค่ากำลังไฟฟ้าประมาณ 48-49 วัตต์ จึง
 สรุปได้ว่าค่าดังกล่าวนี้ถือเป็นการสูญเสียพลังงานโดยเปล่า
 ประโยชน์ และได้กำหนดค่ากำลังไฟฟ้าง่ายมาใช้เป็น
 เกณฑ์สำหรับการแจ้งเตือนให้ทราบเมื่อเกิดเหตุการณ์
 ลักษณะนี้ขึ้น โดยกำหนดช่วงกำลังไฟฟ้าไว้ที่ 0-100 วัตต์
 ($0W < P < 100W$) ซึ่งเกณฑ์ดังกล่าวนี้สามารถนำไปปรับ
 ใช้กับห้องอื่น ๆ ของอาคารได้

2. การออกแบบชุดตรวจวัดค่าทางไฟฟ้า (Power monitoring node)

สำหรับแนวคิดการออกแบบชุดตรวจวัดค่าทาง

ไฟฟ้า (Power Monitoring Node: PMN) ดังแสดงใน
 ภาพ 2 ซึ่งจะประกอบด้วยโมดูลหลัก 4 โมดูล ดังนี้

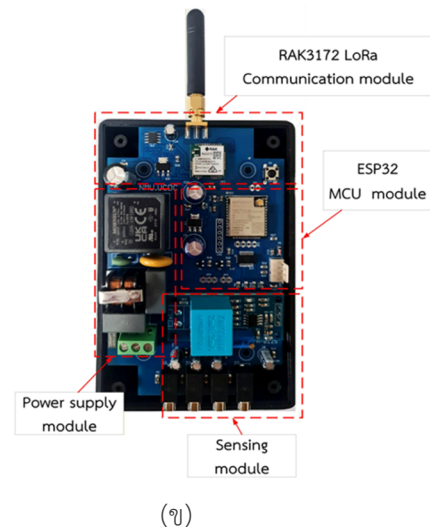
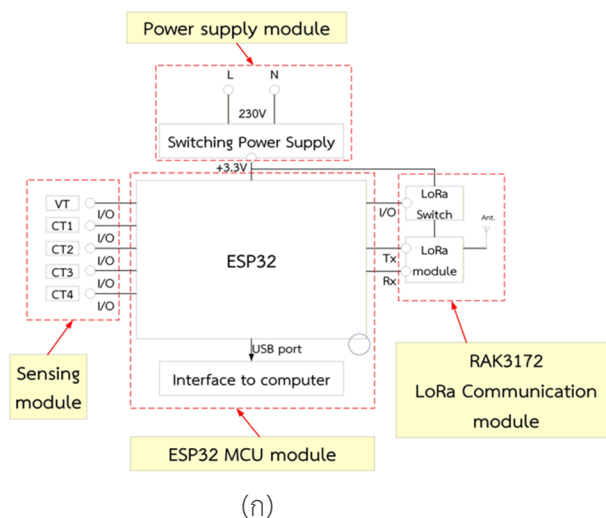
โมดูลแหล่งจ่ายไฟ (power supply module)
 ได้รับการออกแบบให้รองรับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจาก
 ระบบไฟฟ้าภายในอาคาร เพื่อจ่ายพลังงานให้กับวงจร
 อิเล็กทรอนิกส์ทั้งหมดของชุดตรวจวัด

โมดูลอินพุตค่าทางไฟฟ้า (sensing module) ทำ
 หน้าที่รับข้อมูลค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าจากพื้นที่
 ทดสอบ โดยรองรับแรงดันไฟฟ้าได้ 1 ช่องอินพุต และกระแส
 ไฟฟ้าได้สูงสุด 4 ช่องอินพุต ซึ่งงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วิธีการ
 ตรวจวัดกระแสไฟฟ้าแบบไม่สัมผัสเพื่อความปลอดภัย ผ่าน
 ตัวตรวจจับกระแสไฟฟ้าชนิดหม้อแปลงกระแส (CT) ขนาด
 พิกัด 10 แอมแปร์ และตัวตรวจจับแรงดันไฟฟ้ากระแส
 สลับแบบ 1 เฟส 250 Vac ที่สามารถหาซื้อได้ทั่วไปตาม
 ห้างตลาด และมีราคาพอสมควร ดังแสดงในภาพ 3

ตาราง 2

ค่าทางไฟฟ้าของพื้นที่ทดสอบ (ห้องบรรยาย TWP 409)

เวลา	ค่า แรงดัน ไฟฟ้า	ค่า กำลังไฟฟ้า รวม	ค่ากระแสไฟฟ้าของวงจรไฟฟ้าภายในห้องทดสอบ			
			วงจร ไฟแสงสว่าง	วงจร ปรับอากาศ 1	วงจร ปรับอากาศ 2	วงจร เต้ารับไฟฟ้า
7.00 น.	231.65	843.21	3.02	0.00	0.62	0.00
8.00 น.	231.47	1,548.53	3.36	1.34	1.99	0.00
9.00 น.	230.95	1,669.77	3.37	1.32	1.98	0.56
10.00 น.	230.89	2,013.36	3.37	2.13	1.92	1.30
11.00 น.	230.89	1,826.34	2.24	2.11	1.93	1.63
12.00 น.	231.05	1,538.79	2.24	2.24	1.92	0.26
13.00 น.	231.84	1,483.78	0.00	2.22	1.91	2.27
14.00 น.	231.55	1,465.71	0.00	2.21	1.91	2.21
15.00 น.	231.70	604.74	0.00	0.80	0.00	1.81
16.00 น.	231.39	48.59	0.00	0.00	0.00	0.21
17.00 น.	231.60	48.64	0.00	0.00	0.00	0.21



ภาพ 2 ชุดตรวจวัดค่าทางไฟฟ้าที่สร้างขึ้นในงานวิจัย (ก) โครงสร้างวงจร (ข) อุปกรณ์ต้นแบบ

โมดูลสื่อสาร (LoRa communication module) ได้เลือกใช้ RAK3172 ซึ่งรองรับการสื่อสารโปรโตคอล LoRa ที่ความถี่ 923 เมกะเฮิรตซ์ (AS923) โดยมีค่ากำลังส่งที่ 25 มิลลิวัตต์ (14 เดซิเบลมิลลิวัตต์) สอดคล้องกับข้อกำหนดของ กสทช. มท.1033-2560 ที่ต้องรองรับกำลังส่งสูงสุดไม่เกิน 50 มิลลิวัตต์ และมีรูปแบบการสื่อสารในโหมด Class C เพื่อให้สามารถรับ-ส่งข้อมูลได้อย่างต่อเนื่อง โมดูลนี้จะส่งข้อมูลทางไฟฟ้าที่ได้ประมวลผลแล้วไปยังเกตเวย์ทุก ๆ 2 นาที เพื่อลดการใช้พลังงานและรักษาความต่อเนื่องของระบบและให้สอดคล้องกับร้อยละของเวลาครอบครองคลื่นทางความถี่ที่ต้องไม่เกิน 1%

โมดูลประมวลผล (MCU module) งานวิจัยนี้จะเลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ทำหน้าที่ประมวลผลข้อมูลค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ได้จากตัวตรวจจับ จากนั้นทำการปรับสเกลให้เป็นค่าที่ถูกต้อง ก่อนจะส่งข้อมูลไปยังเกตเวย์ เพื่อเชื่อมต่อกับลอราแวนเน็ตเวิร์กเซิร์ฟเวอร์ต่อไป โดยงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้เกตเวย์เชิงพาณิชย์รุ่น Dragino DLOS8N ที่รองรับมาตรฐานการสื่อสาร LoRaWAN Class C ทำให้มั่นใจว่ามีความเสถียรและความเข้ากันได้ของระบบสื่อสารโดยรวม โดยสามารถสรุปค่าคุณลักษณะและข้อกำหนดต่าง ๆ ของชุดตรวจวัดทางไฟฟ้าที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้ดังตาราง 3

นอกจากนั้นก่อนการติดตั้งระบบในพื้นที่ทดลองจริงได้มีการทดสอบความแม่นยำของชุดตรวจวัดค่าทางไฟฟ้า โดยสอบเทียบ (calibration) ค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้ากับเครื่องมือวัดมาตรฐานซึ่งผ่านการสอบเทียบจากห้องปฏิบัติการที่ได้รับการรับรอง ISO/IEC 17025 การทดสอบทำโดยเชื่อมต่อชุดตรวจวัดเข้ากับโหลดอ้างอิงประเภทโหลดไส้ ซึ่งมีลักษณะ

เป็นโหลดเชิงความต้านทาน ดังภาพ 4(ข) เพื่อให้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเป็นเชิงเส้น จากนั้นทำการเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่วัดได้โดยทำการวัดซ้ำในหลายระดับโหลด แล้วนำค่าที่ได้มาคำนวณเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนตามสมการ (1) และปรับค่าพารามิเตอร์การแปลงสัญญาณ (scaling factor) ภายในไมโครคอนโทรลเลอร์ให้ค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน $\pm 5\%$ โดยแสดงผลการสอบเทียบในตาราง 4 แล้วจึงนำชุดตรวจวัดไปติดตั้งเข้ากับวงจรไฟฟ้าจริงดังภาพ 4(ก)

สำหรับการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าไมโครคอนโทรลเลอร์ในชุดตรวจวัดจะทำการอ่านค่าสัญญาณแรงดันไฟฟ้า (V_{ac}) และกระแสไฟฟ้า (I_{ac}) จากตัวตรวจจับ และคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าโดยอ้างอิงหลักการคำนวณค่ารากที่สองของกำลังสองเฉลี่ย (True RMS) ซึ่งคำนวณจากผลคูณของค่าแรงดันไฟฟ้าแบบ RMS (V_{RMS}) และค่ากระแสไฟฟ้าแบบ RMS (I_{RMS}) การเลือกใช้ค่า RMS จะช่วยให้การคำนวณกำลังไฟฟ้ามีความแม่นยำและสะท้อนพฤติกรรมการใช้พลังงานของโหลดไฟฟ้าได้อย่างเหมาะสม นอกจากนั้น ชุดตรวจวัดจะทำการสะสมค่ากำลังไฟฟ้าตามช่วงการส่งข้อมูลทุก 2 นาที เพื่อคำนวณออกมาเป็นค่าพลังงานไฟฟ้า (energy) จากผลการทดสอบพบว่า ชุดตรวจวัดค่าทางไฟฟ้าสามารถวัดค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าได้ใกล้เคียงกับมัลติมิเตอร์มาตรฐาน เช่น ในกรณีของ CT1 (โหลดไฟ 21 ดวง) มีค่าคลาดเคลื่อน 1.66% และ CT4 (เครื่องส่งลมเย็น 3 เครื่อง) มีคลาดเคลื่อน 2.05% ซึ่งอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้

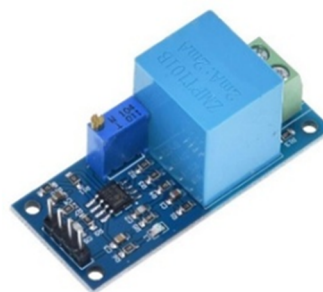
ตาราง 3

ค่าคุณลักษณะและข้อกำหนดต่าง ๆ ของชุดตรวจวัดทางไฟฟ้า

รายการ	ค่าที่กำหนด
แหล่งจ่ายไฟที่ใช้	220-250VAC $\pm 1\%$
ตัวตรวจจับกระแสไฟฟ้า	0-10 A $\pm 3\%$
ตัวตรวจจับแรงดันไฟฟ้า	0-250 VAC $\pm 3\%$
ไมโครคอนโทรลเลอร์	ESP32-WROOM-32U
โมดูลสื่อสาร	RAK3172
ความถี่ที่ใช้	923 MHz
ชุดข้อความ (Payload)	20 bytes
แบนด์วิดท์	125 kHz
แพ็คเกจการกระจาย	7-12
อัตราการเข้ารหัส (CR)	4/5
กำลังส่งสัญญาณ	14 dBm
กำลังส่งของเสาอากาศ	2.15 dBi
ระยะเวลาการส่งข้อมูล	ทุก ๆ 2 นาที



(ก)

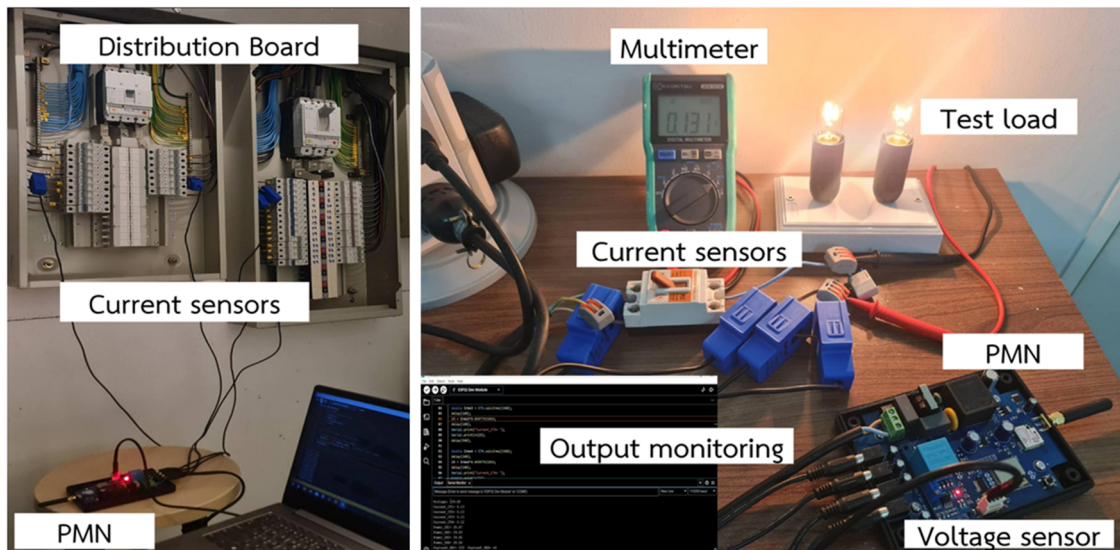


(ข)

ภาพ 3 ตัวตรวจจับที่ใช้ในงานวิจัย (ก) ตัวตรวจจับกระแสไฟฟ้า STC-013 (Iac) (ข) ตัวตรวจจับแรงดันไฟฟ้า ZMPT101B (Vac)

Note. From “SCT-013 split core current transformer,” by Innovatorsguru, 2015 (<https://innovatorsguru.com/sct-013-000/>). Copyright 2012-2026 by Innovatorsguru.

Note. From “ZMPT101B 2mA active single phase voltage transformer module AC output voltage sensor for Arduino mega,” by Mikroelec, 2019 (<https://www.mikroelec.com/product/116/zmpt101b-2ma-active-single-phase-voltage-transformer-module-ac-output-voltage-sensor-for-arduino-meg>). Copyright 2019 by MikroElectronic.



(ก)

(ข)

ภาพ 4 การทดสอบความแม่นยำของชุดตรวจวัดค่าทางไฟฟ้า (ก) ในพื้นที่จริง (ข) ในห้องปฏิบัติการ

3. การพัฒนาชุดแสดงผลและแจ้งเตือนผ่านเว็บแอปพลิเคชัน

งานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้ ThingsBoard Cloud (PAAS) เวอร์ชัน 4.2.1.3 เป็นเว็บแอปพลิเคชันสำหรับแสดงผลค่าทางไฟฟ้าและแจ้งเตือนเหตุการณ์ผิดปกติแบบเรียลไทม์ โดยระบบทำงานบนสถาปัตยกรรมแบบ Client-Server เพื่อให้สามารถติดตามข้อมูลได้ทุกที่ทุกเวลา การเชื่อมต่อข้อมูลทำโดยรับข้อมูล (payload) จากชุดตรวจวัดค่าทางไฟฟ้าผ่าน LoRaWAN Network Server (ChirpStack) ด้วย HTTP Integration และเข้าถึงข้อมูลระหว่างกันผ่าน API Key เพื่อความปลอดภัย ข้อมูลจะถูกประมวลผลผ่าน Rule Engine ซึ่งกำหนดเงื่อนไขให้ทำการแยกชุดข้อมูล (data decoding) และคำนวณพารามิเตอร์ทางไฟฟ้า ได้แก่ ค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า พลังงานไฟฟ้า และค่าใช้จ่ายตามช่วงเวลาใช้งาน ซึ่งหากตรวจพบค่าที่ผิดปกติระบบจะสร้างการแจ้งเตือนผ่านหน้าแดชบอร์ด เพื่อให้ผู้ดูแลอาคารจะดำเนินการเข้าตรวจสอบในพื้นที่จริง (on-site inspection) ดำเนินการแก้ไข (corrective action) และตรวจสอบผลการแก้ไขผ่านหน้าแดชบอร์ดเพื่อยืนยัน (verification) ว่าการใช้พลังงานกลับเข้าสู่สภาวะปกติ โดยข้อมูลที่ประมวลผลแล้วจะถูกจัดเก็บลงในฐานข้อมูล InfluxDB ในรูปแบบอนุกรมเวลา (time-series data) โดยบันทึกพร้อมกับ Timestamp และ Device ID เพื่อรองรับการสืบค้นย้อนหลังและการวิเคราะห์ประสิทธิภาพ

พลังงาน รวมถึงสามารถทำซ้ำและเพิ่มอุปกรณ์ใหม่ได้โดยง่าย ดังแสดงภาพรวมการทำงานของระบบในภาพ 5

สำหรับการแจ้งเตือนได้กำหนดเกณฑ์ตามค่ากำลังไฟฟ้า (P) ของห้องบรรยาย โดยอ้างอิงจากผลการสำรวจค่าทางไฟฟ้าในหัวข้อที่ผ่านมา ดังนี้

กรณี 1: ค่ากำลังไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 0 วัตต์ ($P=0$) หมายถึง ไม่มีการเปิดใช้งานอุปกรณ์ไฟฟ้าภายในห้องบรรยาย

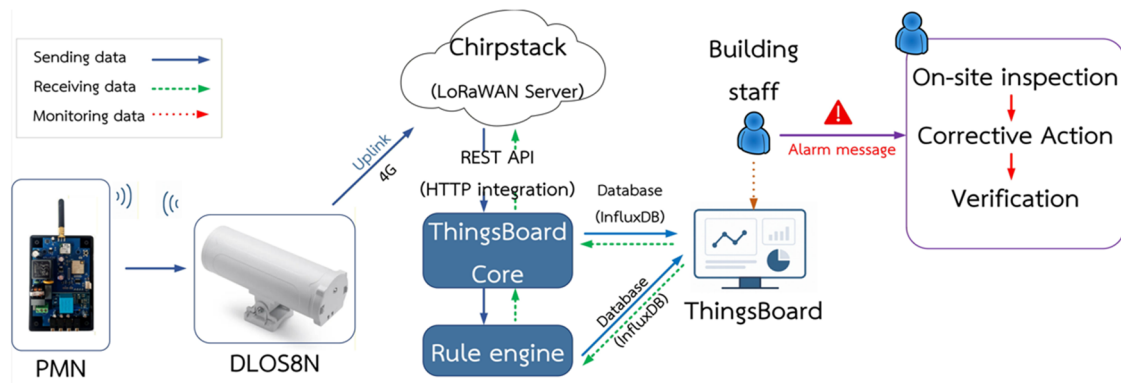
กรณี 2: ค่ากำลังไฟฟ้าอยู่ในช่วง 0 ถึง 100 วัตต์ ($0 < P < 100$) หมายถึง มีการเปิดใช้งานอุปกรณ์ไฟฟ้าบางส่วนเล็กน้อย

กรณี 3: ค่ากำลังไฟฟ้ามีค่ามากกว่า 100 วัตต์ ($P > 100$) หมายถึง มีการเปิดใช้งานอุปกรณ์ไฟฟ้าจากกิจกรรมต่าง ๆ ซึ่งระบบจะทำการแจ้งเตือนสถานะ “alarm” เฉพาะในกรณีที่ 2 เนื่องจากเป็นช่วงที่แสดงถึงการใช้พลังงานโดยไม่เกิดประโยชน์จากการลิมิตอุปกรณ์หรือการใช้พลังงานในโหมดสแตนด์บาย ระบบจะไม่แจ้งเตือนในกรณีที่ไม่มีกิจกรรมภายในห้อง ($P=0$ W) หรือมีการใช้งานปกติ ($P > 100$ W) เพื่อหลีกเลี่ยงการแจ้งเตือนเกินจำเป็น ทั้งนี้ การแจ้งเตือนจะปรากฏบนหน้าจอแสดงผล (dashboard) ของ ThingsBoard แบบเรียลไทม์ และสามารถเก็บบันทึกผลข้อมูลเพื่อนำมาวิเคราะห์ในภายหลังได้ ดังแสดงในภาพ 6

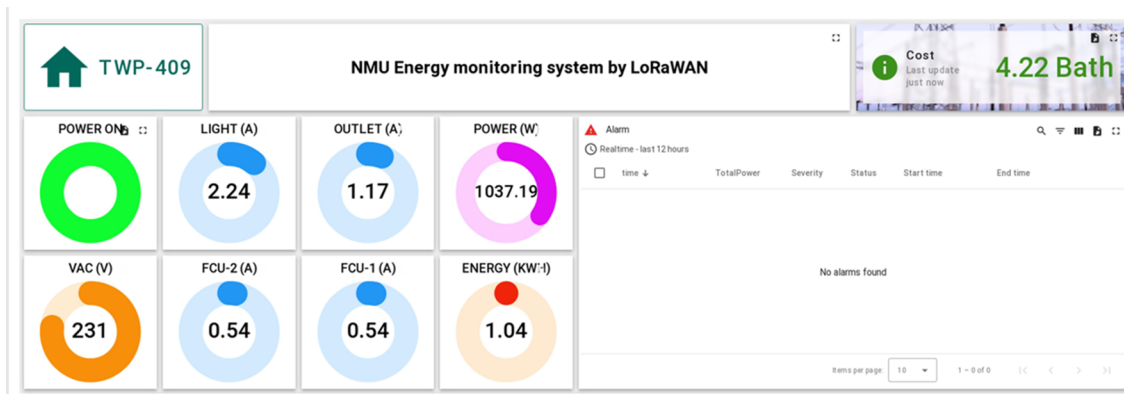
ตาราง 4

ค่าความคลาดเคลื่อนของชุดตรวจวัดค่าทางไฟฟ้าเทียบกับมัลติมิเตอร์มาตรฐาน

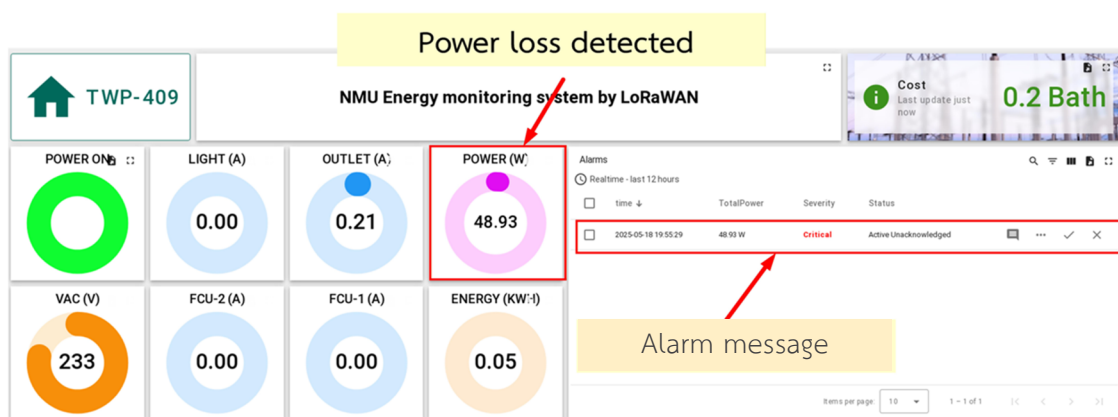
ตัวตรวจจับ	โหลด	ค่าที่วัดได้ (ค่าเฉลี่ย)		
		PMN	มัลติมิเตอร์มาตรฐาน	%ความคลาดเคลื่อน
VT	แหล่งจ่ายไฟฟ้า	228 โวลต์	230 โวลต์	0.87%
CT1	หลอดไฟแสงสว่าง (7 หลอด)	1.12 แอมแปร์	1.13 แอมแปร์	0.88%
	หลอดไฟแสงสว่าง (14 หลอด)	2.24 แอมแปร์	2.27 แอมแปร์	1.47%
	หลอดไฟแสงสว่าง (21 หลอด)	3.36 แอมแปร์	3.42 แอมแปร์	1.66%
CT2	คอมพิวเตอร์ 1 เครื่อง โปรเจคเตอร์ 1 เครื่อง	2.60 แอมแปร์	2.63 แอมแปร์	1.02%
	เครื่องขยายเสียง 1 ชุด โทรทัศน์ 2 เครื่อง			
	คอมพิวเตอร์ 1 เครื่อง โปรเจคเตอร์ 1 เครื่อง	1.40 แอมแปร์	1.43 แอมแปร์	1.87%
CT3	เครื่องส่งลมเย็น (1 เครื่อง)	0.66 แอมแปร์	0.67 แอมแปร์	1.49%
	เครื่องส่งลมเย็น (2 เครื่อง)	1.34 แอมแปร์	1.38 แอมแปร์	2.90%
	เครื่องส่งลมเย็น (3 เครื่อง)	2.08 แอมแปร์	2.13 แอมแปร์	2.19%
CT4	เครื่องส่งลมเย็น (1 เครื่อง)	0.64 แอมแปร์	0.66 แอมแปร์	2.54%
	เครื่องส่งลมเย็น (2 เครื่อง)	1.36 แอมแปร์	1.38 แอมแปร์	1.45%
	เครื่องส่งลมเย็น (3 เครื่อง)	2.07 แอมแปร์	2.11 แอมแปร์	2.05%



ภาพ 5 ภาพรวมการทำงานของระบบ



(ก)



(ข)

ภาพ 6 หน้าจอแสดงผล (Dashboard) (ก) กรณีปกติ (ข) กรณีมีการแจ้งเตือน

จากภาพแสดงหน้าจอแสดงผลของห้องบรรยาย เมื่อมีการใช้งานอุปกรณ์ไฟฟ้าในห้องแดชบอร์ดจะแสดงสถานะ “Power on” ด้วยแถบสีเขียวเพื่อบ่งชี้ว่ามีกระแสไฟฟ้าไหลอยู่ในระบบ ดังภาพ 6(ก) แสดงค่ากระแสไฟฟ้าของอุปกรณ์ที่ใช้งานตามจริง รวมถึงค่ากำลังไฟฟ้า พลังงาน และค่าใช้จ่าย โดยค่ากำลังไฟฟ้ามีค่า 1,037.19 วัตต์ ซึ่งไม่เข้าเงื่อนไขการสูญเสียพลังงาน จึงไม่มีการแจ้งเตือนปรากฏในตาราง Alarm ในทางตรงกันข้ามภาพ 6(ข) แสดงกรณีที่ระบบตรวจพบการใช้พลังงานโดยเปล่าประโยชน์หรืออยู่ในโหมดสแตนด์บาย โดยค่ากำลังไฟฟ้าลดลงเหลือ 48.93 วัตต์ ซึ่งอยู่ในช่วงเงื่อนไขการแจ้งเตือน ($0 < P < 100$ W) ระบบจึงสร้างการแจ้งเตือนโดยอัตโนมัติ พร้อมระบุเวลาและสถานะของเหตุการณ์ในตาราง “Alarm message”

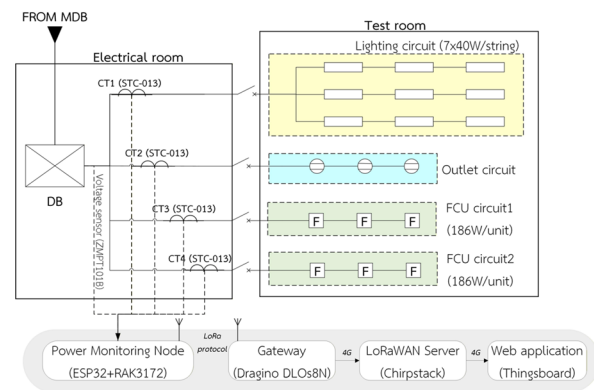
เพื่อให้ผู้ดูแลอาคารที่เป็นผู้ใช้งานระบบสามารถตรวจสอบและดำเนินการปิดอุปกรณ์ที่ไม่จำเป็นได้อย่างทัน่วงที

4. การติดตั้งระบบตรวจจัดการสูญเสียพลังงาน

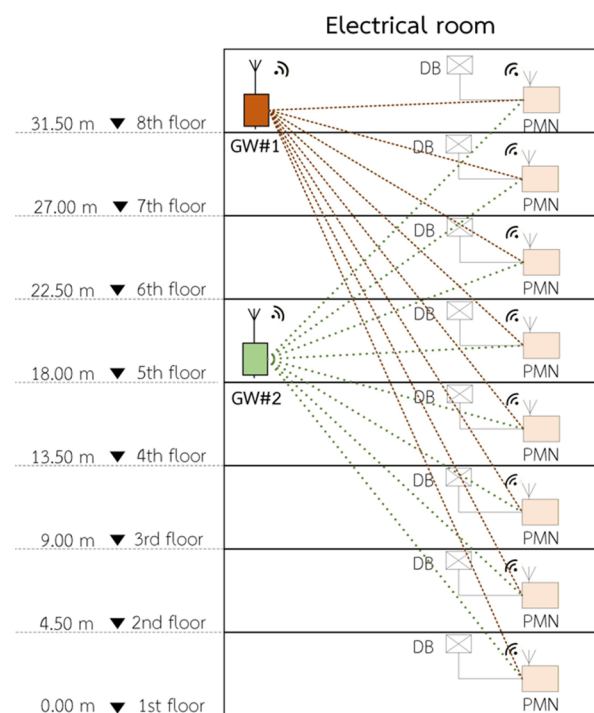
ขั้นตอนสุดท้ายเป็นการติดตั้งระบบตรวจจัดการสูญเสียพลังงานเพื่อเก็บข้อมูลในพื้นที่ห้องบรรยาย TWP409 จำนวน 1 ห้อง ซึ่งเป็นช่วงการใช้งานปกติของอาคาร ไม่มีการปรับปรุงหรือซ่อมแซมระบบไฟฟ้าที่อาจส่งผลกระทบต่อข้อมูลการตรวจวัด โดยได้ติดตั้งชุดตรวจวัดทางไฟฟ้าไว้ภายในห้องไฟฟ้าชั้น 4 ของอาคาร เพื่อทำการตรวจวัดค่าแรงดันไฟฟ้าและค่ากระแสไฟฟ้าของอุปกรณ์ไฟฟ้าภายในห้อง โดยสามารถแสดงภาพรวมการติดตั้งระบบดังภาพ 7

นอกจากนี้ในส่วนของการติดตั้งเกตเวย์ได้ทำการทดสอบจุดติดตั้งเกตเวย์จำนวน 2 จุดภายในอาคารสูง 8 ชั้น เพื่อประเมินสมรรถนะในการรับ-ส่งข้อมูลของโครงข่าย LoRaWAN โดยใช้โมดูลสื่อสาร LoRa รุ่น RAK3172 พร้อมเสาอากาศ ซึ่งติดตั้งอยู่ในชุดตรวจวัดค่าทางไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น ทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์รับสัญญาณจากเกตเวย์สำเร็จรูป และกำหนดตำแหน่งที่หนึ่งคือในห้องไฟฟ้าบริเวณชั้นบนสุดของอาคาร (เกตเวย์ #1) และตำแหน่งที่สองติดตั้งในห้องไฟฟ้าบริเวณชั้น 5 ซึ่งเป็นตำแหน่งกึ่งกลางของอาคาร (เกตเวย์ #2) จากนั้นทำการทดสอบการรับ-ส่งข้อมูลจากชุดตรวจวัดค่าทางไฟฟ้าตั้งแต่ชั้น 1 ถึงชั้น 8 ภายใต้สภาพแวดล้อมจริงภายในอาคาร ดังแสดงในภาพ 8 และสามารถสรุปผลการทดสอบคุณภาพของสัญญาณได้ดังตาราง 5

จากข้อมูลในตาราง 5 รวมถึงภาพ 9(ก) และภาพ 9(ข) ได้แสดงการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Mean±SD) ของค่า RSSI และค่า SNR ในแต่ละชั้นของอาคาร จากการติดตั้งเกตเวย์ 2 ตำแหน่งพบว่า เกตเวย์#2 ซึ่งติดตั้งในตำแหน่งกึ่งกลางอาคารให้ค่า RSSI สูงกว่าเกตเวย์ #1 ในเกือบทุกชั้น สะท้อนให้เห็นถึงประสิทธิภาพของการติดตั้งเกตเวย์ในตำแหน่งที่สามารถกระจายสัญญาณได้ทั้งทิศทางขึ้นและลงอย่างเหมาะสม ขณะเดียวกันค่า SNR ของเกตเวย์#2 โดยเฉพาะในชั้น 3-6 ค่า SNR จะอยู่ในช่วง 10-14 dB แสดงถึงคุณภาพสัญญาณที่ดีและมีสัญญาณรบกวนต่ำ ในทางตรงกันข้ามเกตเวย์#1 มีค่า SNR ติดลบในหลายชั้น โดยเฉพาะชั้นที่ 1 มีค่าเท่ากับ -7.65 dB แสดงถึงความเสี่ยงในการสูญเสียข้อมูลสูง นอกจากนี้เมื่อพิจารณาค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสังเกตได้ว่าเมื่อชุดตรวจวัดค่าทางไฟฟ้าอยู่ห่างจากเกตเวย์มากขึ้น ค่าที่วัดได้จะมีความผันผวนสูงขึ้น และจะมีค่าต่ำเมื่ออยู่ใกล้กัน แสดงถึงความสม่ำเสมอและความเสถียรในการรับ-ส่งข้อมูล ทั้งนี้ ความผันผวนดังกล่าวอาจมาจากสภาพแวดล้อมภายในอาคาร เช่น โครงสร้างอาคารหรือคลื่นรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (EMI) จากอุปกรณ์ไฟฟ้าใกล้เคียง



ภาพ 7 ภาพรวมการติดตั้งระบบ

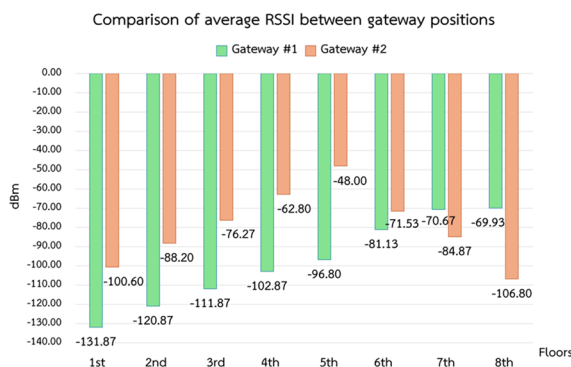


ภาพ 8 การทดสอบคุณภาพสัญญาณของการสื่อสาร LoRa ภายในอาคาร

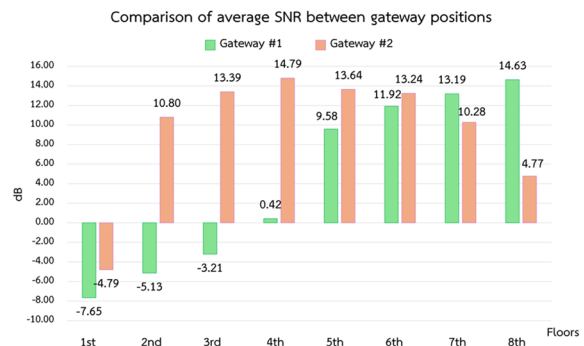
ตาราง 5

คุณภาพสัญญาณของเครือข่าย LoRaWAN ภายในอาคาร

ชั้น	เกตเวย์#1				เกตเวย์#2			
	RSSI	RSSI (dBm)	SNR	SNR (dB)	RSSI	RSSI (dBm)	SNR	SNR (dB)
	(dBm)	(Mean±SD)	(dB)	(Mean±SD)	(dBm)	(Mean±SD)	(dB)	(Mean±SD)
1	-131.87	-131.87±1.85	-7.65	-7.65±5.65	-100.60	-100.60±1.36	-4.79	-4.79±4.27
2	-120.87	-120.87±1.60	-5.13	-5.13±2.94	-88.20	-88.20±0.75	10.80	10.80±1.22
3	-111.87	-111.87±1.55	-3.21	-3.21±2.64	-76.27	-76.27±0.57	13.39	13.39±0.32
4	-102.53	-102.53±1.46	0.42	0.42±2.97	-62.80	-62.80±0.40	14.79	14.79±0.29
5	-96.80	-96.80±0.41	9.58	9.58±0.94	-48.00	-48.00±0.00	13.64	13.64±0.26
6	-81.13	-81.13±0.35	11.92	11.92±0.30	-71.53	-71.53±0.50	13.24	13.24±0.61
7	-70.67	-70.67±0.49	13.19	13.19±0.33	-84.87	-84.87±1.26	10.28	10.28±1.35
8	-69.93	-69.93±1.71	14.63	14.63±1.50	-106.80	-106.80±6.81	4.77	4.77±1.09



(ก)



(ข)

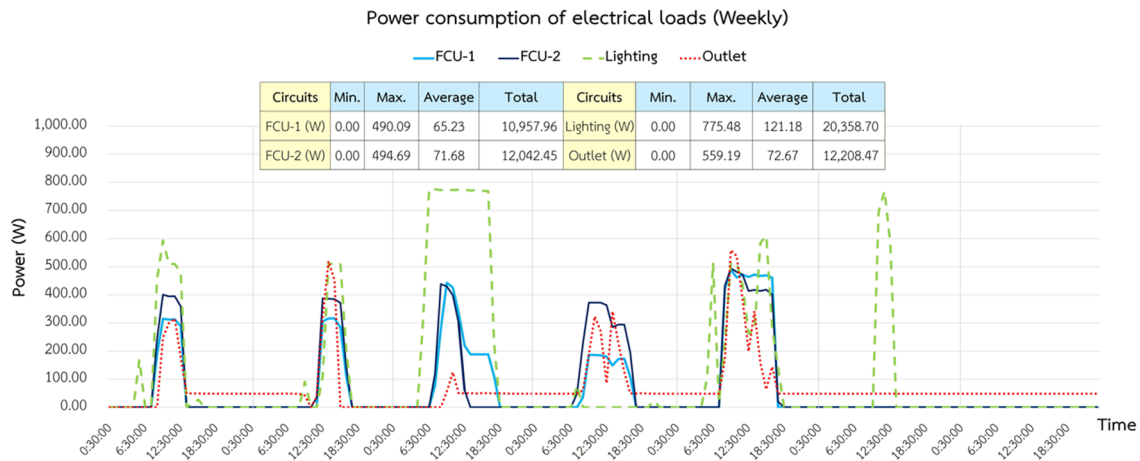
ภาพ 9 ค่าคุณภาพสัญญาณระหว่างเกตเวย์สองตำแหน่งต่างกัน (ก) ค่า RSSI (ข) ค่า SNR

ดังนั้นจึงเลือกติดตั้งเกตเวย์ในตำแหน่งกึ่งกลางของอาคาร เพื่อเพิ่มความครอบคลุมของสัญญาณ นอกจากนี้ ตำแหน่งกึ่งกลางอาคารยังช่วยให้รูปแบบการกระจายสัญญาณของเสาอากาศมีความสมดุลมากขึ้น ลดผลกระทบจากมุมอับของสัญญาณ และการสะท้อนของคลื่นที่มักเกิดในอาคารหลายชั้น และให้การสื่อสารรับ-ส่งข้อมูลกับชุดตรวจวัดค่าทางไฟฟ้าที่ติดตั้งที่ชั้น 4 เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพและมีความเสถียรมากยิ่งขึ้น

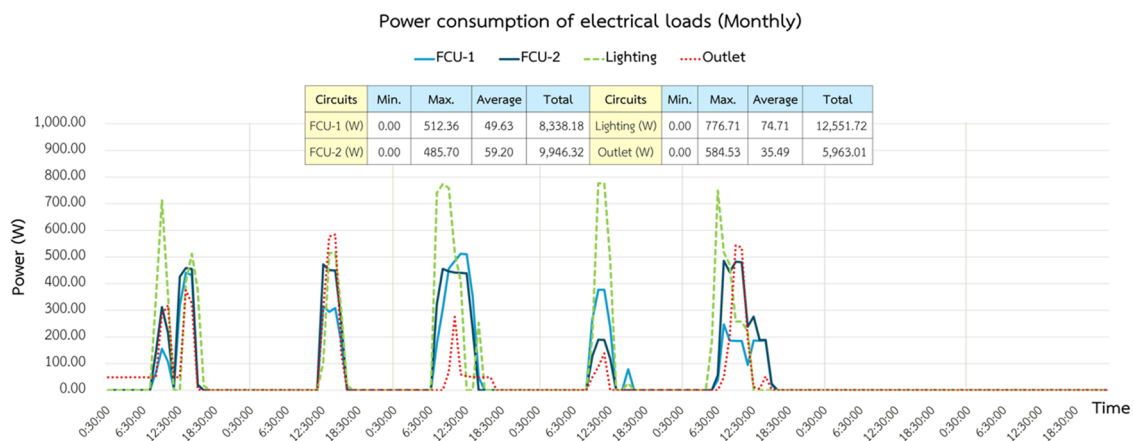
ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

1. ผลการบันทึกและการวิเคราะห์ข้อมูลของระบบตรวจจับการสูญเสียพลังงานไฟฟ้า

ในช่วงแรกของการทดสอบได้ทำการติดตั้งระบบตรวจจับการสูญเสียพลังงานเพื่อศึกษาลักษณะการใช้พลังงานไฟฟ้าภายในพื้นที่ โดยบันทึกและแสดงผลข้อมูลกำลังไฟฟ้าเป็นระยะเวลา 1 สัปดาห์ ดังภาพ 10 พบว่า ค่ากำลังไฟฟ้าของอุปกรณ์แต่ละชนิดมีรูปแบบการใช้งานที่สอดคล้องกับช่วงเวลาเรียนระหว่าง 09.00–17.00 น. โดยลักษณะของค่ากำลังไฟฟ้าที่เกิดจากการใช้งานของผู้ใช้อาคารมีความแปรปรวนจากปัจจัยหลายประการ เช่น ความถี่ในการใช้งานอุปกรณ์ไฟฟ้า เวลาเรียน กิจกรรมพิเศษนอกตารางเรียน รวมถึงกระบวนการทำความสะอาดหลังเลิกเรียน ส่งผลให้ค่ากำลังไฟฟ้าและช่วงเวลาการใช้งานในแต่ละวันไม่คงที่โดยพบการใช้พลังงานของวงจรไฟแสงสว่างในช่วงนอกเวลาทำงานเป็นครั้งคราว เมื่อตรวจสอบพบว่า มาจากการทำความสะอาดห้องหลังเลิกเรียนและการเปิดไฟทิ้งไว้



ภาพ 10 ภาพรวมค่ากำลังไฟฟ้าของห้องบรรยายในระยะเวลา 1 สัปดาห์ ก่อนการปรับปรุง



ภาพ 11 ภาพรวมค่ากำลังไฟฟ้าของห้องบรรยายในระยะเวลา 1 สัปดาห์ ภายหลังการปรับปรุง

นอกจากนั้น เมื่อพิจารณาค่ากำลังไฟฟ้าของวงจร
 เตารับไฟฟ้า พบค่ากำลังไฟฟ้าระดับต่ำอย่างต่อเนื่องโดยมี
 ค่าเฉลี่ย 48.73 วัตต์ ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่ามาจากประเภท
 ของอุปกรณ์ไฟฟ้ากลุ่มเดียวกัน สอดคล้องกับการแจ้งเตือน
 จากระบบ ซึ่งมาจากการเปิดสวิตช์ไฟของปลั๊กพ่วงไฟฟ้าที่
 เชื่อมต่อกับอุปกรณ์เครื่องขยายเสียงและโปรเจกเตอร์ทิ้งไว้
 โดยไม่ได้เปิดใช้งานอุปกรณ์ดังกล่าว ส่งผลให้เกิดการใช้
 พลังงานในโหมดสแตนด์บาย ซึ่งแม้จะมีค่ากำลังไฟฟ้าไม่
 สูงมาก แต่ถือเป็นการสูญเสียพลังงานโดยไม่ได้ก่อให้เกิด
 ประโยชน์ในการใช้งานจริง ผู้วิจัยจึงได้แจ้งข้อมูลดังกล่าว
 ให้ผู้ดูแลอาคารทราบ พร้อมเสนอให้ทดลองใช้ระบบตรวจจับ
 สูญเสียพลังงาน ผลพบว่า ระบบสามารถแจ้งเตือนและช่วย
 สนับสนุนการตัดสินใจของผู้ดูแลอาคารในการดำเนินการลด
 การสูญเสียพลังงานโดยเปล่าประโยชน์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ
 สังเกตได้จากค่ากำลังไฟฟ้าของวงจรเตารับไฟฟ้าในภาพ 11
 ซึ่งไม่ปรากฏการใช้พลังงานในระดับต่ำอย่างต่อเนื่องเป็น
 ระยะเวลาสั้น เนื่องจากการดำเนินการแก้ไขได้ทันเวลาที่

อย่างไรก็ตาม เพื่อให้สามารถประเมินผลการ
 ทดลองได้อย่างชัดเจน จึงดำเนินการเก็บข้อมูลอย่างต่อเนื่อง
 เป็นระยะเวลา 4 สัปดาห์ทั้งก่อนและหลังการปรับปรุงผ่าน
 ระบบที่พัฒนาขึ้นและดำเนินการแก้ไขเมื่อพบเหตุการณ์ผิด
 ปกติ โดยสามารถสรุปผลจากข้อมูลบันทึกการทำงานของ
 ระบบ (data log) ได้ดังตาราง 6 ผลข้อมูลพลังงานไฟฟ้า
 สูญเสียในโหมดสแตนด์บายแสดงให้เห็นว่า ค่ากำลังไฟฟ้า
 เฉลี่ยทั้งก่อนการปรับปรุงและหลังการปรับปรุงตลอดระยะ
 เวลาทดลองมีค่าใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 48-49 วัตต์ ซึ่งเป็น
 ค่าที่เกิดจากโหลดชนิดเดียวกัน โดยก่อนการปรับปรุงพบ
 ระยะเวลาการสูญเสียพลังงานจากโหมดสแตนด์บายมีค่า
 เท่ากับ 164.42 ชั่วโมง คิดเป็นค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสีย
 รวม 7,977.73 วัตต์ชั่วโมง ขณะที่หลังการปรับปรุง ระยะ
 เวลาดังกล่าวลดลงเหลือ 1.72 ชั่วโมง ส่งผลให้พลังงาน
 ไฟฟ้าสูญเสียลดลง 7,892.77 วัตต์ชั่วโมง หรือคิดเป็นการ
 ลดลงมากกว่าร้อยละ 98.63

ตาราง 6

ค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียจากการใช้พลังงานในโหมดสแตนด์บายของอุปกรณ์ไฟฟ้าตลอดระยะเวลา 4 สัปดาห์

ตัวแปร	ก่อนปรับปรุง	หลังปรับปรุง
กำลังไฟฟ้าสูญเสียเฉลี่ย (วัตต์)	48.58	49.52
ระยะเวลา (ชั่วโมง)	164.42	1.72
พลังงานไฟฟ้าสูญเสียเฉลี่ย (วัตต์ชั่วโมง)	7,977.73	84.96

การทดลองอย่างชัดเจนของระยะเวลาการสูญเสียพลังงานดังกล่าว สะท้อนให้เห็นถึงการตอบสนองของผู้ดูแลอาคารที่มีต่อการแจ้งเตือนของระบบ โดยการแสดงผลข้อมูลเชิงตัวเลขทำให้สามารถรับรู้และตระหนักถึงการสูญเสียพลังงานได้อย่างชัดเจนและสนับสนุนการตัดสินใจเป็นผลให้เกิดการตรวจสอบและดำเนินการปิดอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ไม่ได้ใช้งานอย่างทันท่วงที ซึ่งช่วยลดการใช้พลังงานในโหมดสแตนด์บายที่ไม่จำเป็นและต่อเนื่อง

2. สมรรถนะการรับ-ส่งข้อมูลของระบบตรวจจับการสูญเสียพลังงาน

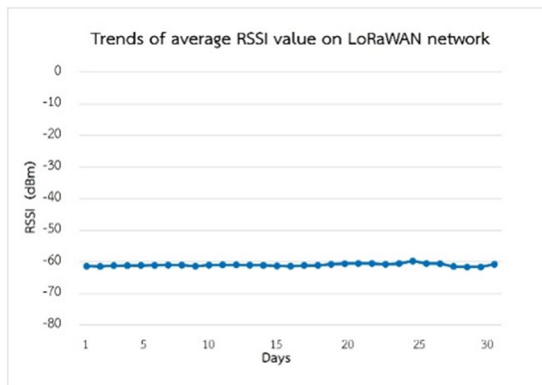
ในการวัดสมรรถนะการรับ-ส่งข้อมูลของระบบตรวจจับการสูญเสียพลังงาน ผู้วิจัยได้ทำการบันทึกข้อมูลการสื่อสารระหว่างระหว่างชุดตรวจวัดค่าทางไฟฟ้าและเกตเวย์ โดยแสดงผลค่า RSSI และค่า SNR ในระยะเวลา 1 เดือน

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ระบบมีสมรรถนะการรับ-ส่งข้อมูลที่มีความเสถียรและอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ โดยค่า RSSI เฉลี่ยของระบบมีค่าเท่ากับ -61.01 เดซิเบลมิลลิวัตต์ และมีแนวโน้มค่อนข้างคงที่ แสดงถึง ความเสถียรในการรับ-ส่งข้อมูลของระบบและมีความต่อเนื่องของการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ ดังแสดงในภาพ 12(ก) ในขณะที่ค่า SNR มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 14.70 เดซิเบล ดังภาพ 12(ข) แม้ว่าจะพบการแกว่งของค่าบางช่วงเวลา แต่ค่า SNR ยังคงมีค่าเป็นบวกและอยู่ในระดับที่เหมาะสม สะท้อนให้เห็นว่า

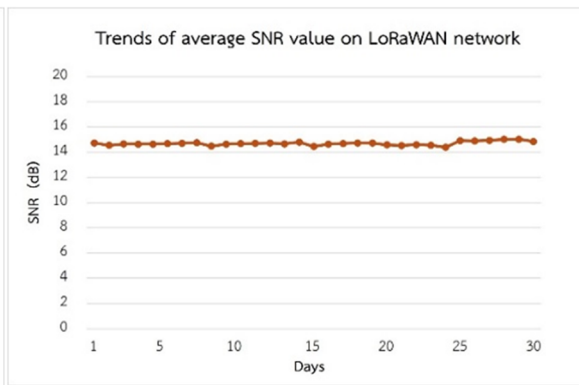
สัญญาณหลักมีความชัดเจนมากกว่าสัญญาณรบกวน ทั้งนี้เนื่องมาจากการติดตั้งเกตเวย์ในตำแหน่งกึ่งกลางของอาคารสามารถช่วยลดระยะทางการสื่อสารและจำนวนสิ่งกีดขวางที่สัญญาณต้องผ่านในทุกทิศทาง ทำให้สามารถลดผลกระทบจากข้อจำกัดด้านโครงสร้างอาคารที่เป็นคอนกรีตเสริมเหล็กหลายชั้น ซึ่งอาจทำให้การแพร่กระจายของคลื่นวิทยุถูกลดทอนเมื่อสัญญาณต้องผ่านพื้นและผนังคอนกรีตจำนวนมาก

นอกจากนี้ พบว่า ผลลัพธ์มีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kanadee and Chaimool (2024) และอยู่ในระดับที่ดีกว่า โดยเฉพาะค่า SNR ที่มีค่าเป็นบวกอย่างต่อเนื่อง สะท้อนให้เห็นถึงความชัดเจนของสัญญาณหลักเมื่อเทียบกับสัญญาณรบกวน ทั้งนี้ ความแตกต่างของค่าเชิงปริมาณอาจเกิดจากตำแหน่งการติดตั้งเกตเวย์ที่อยู่กึ่งกลางอาคาร ซึ่งช่วยลดระยะทางการสื่อสารและจำนวนสิ่งกีดขวาง ส่งผลให้การแพร่กระจายของคลื่นวิทยุมีประสิทธิภาพมากขึ้น

กล่าวได้ว่าสมรรถนะการสื่อสารของระบบตรวจจับการสูญเสียพลังงานที่พัฒนาขึ้นนี้มีความเสถียรและน่าเชื่อถือภายใต้สภาพแวดล้อมภายในอาคาร ทั้งค่า RSSI และ SNR อยู่ในระดับที่เหมาะสมต่อการรับ-ส่งข้อมูลทางไฟฟ้าได้แบบต่อเนื่อง อย่างไรก็ตาม ผลการทดลองนี้เป็นผลที่ได้จากการติดตั้งระบบเพียง 1 ห้อง หากมีการขยายการติดตั้งไปยังห้องหรือพื้นที่อื่นเพิ่มเติม อาจพิจารณาการใช้เสาอากาศที่มีกำลังขยายสูงขึ้น หรือการปรับตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ให้เหมาะสมยิ่งขึ้น เพื่อลดผลกระทบจากสิ่งกีดขวางและการรบกวนของสัญญาณ



(ก)



(ข)

ภาพ 12 ค่าคุณภาพสัญญาณระยะเวลา 4 สัปดาห์ (ก) ค่าความแรงของสัญญาณ (RSSI) (ข) อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR)

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้นำเสนอระบบตรวจจับการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าของอาคารในระดับพื้นที่ย่อย (รายห้อง) โดยประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก ได้แก่ ส่วนตรวจวัดค่าทางไฟฟ้าที่ประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการสื่อสารแบบไร้สาย LoRa ร่วมกับโครงข่าย LoRaWAN เพื่อตรวจวัดและสื่อสารข้อมูลไปยังส่วนแสดงผลผ่านเว็บแอปพลิเคชัน ThingsBoard เพื่อแสดงผลและแจ้งเตือนแบบทันทีทันใดเมื่อเกิดการใช้พลังงานที่ผิดปกติ ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่า ระบบดังกล่าวสามารถวัดและแสดงผลข้อมูลค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าได้โดยมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของการวัดไม่เกิน $\pm 3\%$ เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐาน นอกจากนี้ ระบบยังแสดงให้เห็นถึงสมรรถนะด้านการรับ-ส่งข้อมูลที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานภายในอาคาร จากค่าความแรงของสัญญาณ (RSSI) และค่าอัตราส่วนสัญญาณที่ได้รับต่อสัญญาณรบกวน (SNR) อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ สามารถรับ-ส่งข้อมูลได้อย่างต่อเนื่อง แม้อยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีข้อจำกัดด้านการสื่อสาร อีกทั้งระบบสามารถติดตาม ตรวจจับการสูญเสียพลังงาน และแจ้งเตือนได้ตามเงื่อนไขค่ากำลังไฟฟ้าในการตรวจจับโหลดสแตนด์บายของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่กำหนดไว้ โดยการแจ้งเตือนของระบบที่แม่นยำมีส่วนช่วยในการบริหารจัดการพลังงานได้

อย่างรวดเร็ว ส่งผลให้สามารถลดการสูญเสียพลังงานได้ถึง 7,892.77 วัตต์ชั่วโมง หรือคิดเป็นการลดลงมากกว่าร้อยละ 98.63 หลังการติดตั้งระบบ

อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาจากห้องตัวแทนของอาคารเพียง 1 ห้อง และทดลองเก็บข้อมูลหลังการใช้งานระบบเพียง 4 สัปดาห์ ซึ่งอาจยังไม่ครอบคลุมรูปแบบการใช้งานที่หลากหลาย ดังนั้น เพื่อเพิ่มศักยภาพของระบบและการนำไปประยุกต์ใช้ในระดับที่กว้างขึ้น สามารถเพิ่มฟังก์ชันการควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้าให้สามารถเปิด-ปิดการทำงานโดยอัตโนมัติเมื่อไม่มีการใช้งาน และเพื่อลดข้อผิดพลาดจากการลิมิตอุปกรณ์ของผู้ใช้งานอาคาร รวมถึงการเพิ่มจำนวนชุดตรวจวัดค่าทางไฟฟ้าให้ครอบคลุมทุกพื้นที่ของอาคาร เพื่อประเมินสมรรถนะของระบบภายใต้เงื่อนไขที่หลากหลาย นอกจากนั้น วิเคราะห์ความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์เพื่อส่งเสริมการใช้งานจริงในภาคปฏิบัติ

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยนวมินทราชินา ที่ให้การสนับสนุนข้อมูลในการดำเนินงานวิจัย สถานที่ และเครื่องมือต่าง ๆ อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการทำงานวิจัยนี้



References

- Al-Sammak, K. A., Al-Gburi, S. H., Marghescu, I., Drăgulescu, A.-M. C., Marghescu, C., Martian, A., Al-Sammak, N. A., Suci, G., & Alheeti, K. M. A. (2025). Optimizing IoT energy efficiency: Real-time adaptive algorithms for smart meters with LoRaWAN and NB-IoT. *Energies*, 18(4), 987. <https://doi.org/10.3390/en18040987>
- Bin, M., Kamarudin, C., Ayob, A., Hussain, A., Ansari, S., Abdolrasol, M., Mohamad, Bin, H., & Saad, M. H. (2024). Review of LoRaWAN: Performance, key issues and future perspectives. *Jurnal Kejuruteraan*, 36, 1-12. [https://doi.org/10.17576/jkukm-2024-36\(2\)-02](https://doi.org/10.17576/jkukm-2024-36(2)-02)
- Goh, J. Y., & Chua, D. W. (2024). A comparative analysis of wired vs. wireless data communication technologies. *International Journal of Electrical and Data Communication*, 5(2), 8-12. <https://www.datacomjournal.com/article/44/5-2-2-556.pdf>
- Guevara, N. E., Bolaños, Y. H., Diago, J. P., & Segura, J. M. (2022). Development of a low-cost IoT system based on LoRaWAN for monitoring variables related to electrical energy consumption in low voltage networks. *HardwareX*, 12, e00330. <https://doi.org/10.1016/j.ohx.2022.e00330>
- Hassan, A., Afrouzi, H., Siang, C., Ahmed, J., Mehrazamir, K., & Wooi, C. L. (2022). A survey and bibliometric analysis of different communication technologies available for smart meters. *Cleaner Engineering and Technology*, 7, 100424. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100424>
- InnovatorsGuru. (2015). *SCT-013 split core current transformer*. <https://innovatorsGuru.com/sct-013-000/>
- Jain, S., Pradish, M., Paventhan, A., Saravanan, M., & Das, A. (2018). Smart energy metering using LPWAN IoT technology. In R. Pillai (Ed.), *The 3rd International Conference and Exhibition on Smart Grids and Smart Cities Compendium of Technical Papers* (pp. 1-4). Springer.
- Kanadee, T., & Chaimool, S. (2024). Application of LoRaWAN-based system for electric energy monitoring and data acquisition in a smart building [In Thai]. *The Journal of KMUTNB*, 34(3), 1-13. <https://doi.org/10.14416/j.kmutnb.2022.05.005>
- Khunboa, C. (2019). *IoT: Internet of Things* [In Thai]. Se-education.
- Khunboa, C. (2023). *Adapted from develop IoT on ESP32 microcontroller with MicroPython language* [In Thai]. Chulabook.
- Mikroelec. (2019). *ZMPT101B 2mA active single phase voltage transformer module AC output voltage sensor for arduino mega* [In Thai]. <https://www.mikroelec.com/product/116/zmpt101b-2ma-active-single-phase-voltage-transformer-module-ac-output-voltage-sensor-for-arduino-meg>.
- Montagny, S. (2022). *LoRa - LoRaWAN and Internet of Things for beginners*. Université Savoie Mont Blanc. <https://www.univ-smb.fr/lorawan/wp-content/uploads/2022/01/Book-LoRa-LoRaWAN-and-Internet-of-Things.pdf>
- National Broadcasting and Telecommunications Commission [NBTC]. (2017). *Technical standards for Radio Communication Devices, Radio Frequency Identification: RFID* [In Thai]. Royal Thai Government Gazette. <https://www.ratchakitcha.soc.go.th/DATA/PDF/2560/E/289/50.PDF>

- Nunak, N., & Suesat, T. (2012). *Measurement and instrumentation* [In Thai]. Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL).
- Rahman, A., Zaman, F., & Abdullah, S. (2018). Performance analysis of LPWAN using LoRa technology for IoT application. *International Journal of Engineering and Technology (UAE)*, 7, 212-216. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.11.20808>
- Ramadhan, S., Lisapaly, L., & Boesrony, D. (2021). Smart energy monitoring based on IoT Lora-Wan on the campus buildings: Case study Indonesian Defence University (Unhan), Sentul, Bogor. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 878, 1-7. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/878/1/012065>
- Salam, R. A., Ratyal, N. I., Ahmed, U., Aziz, I., Sajid, M., & Mahmood, A. (2024). An overview of recent wireless technologies for IoT-enabled smart grids. *Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2024, 2568751. <https://doi.org/10.1155/jece/2568751>
- Santos, D., & Ferreira, J. C. (2019). IoT power monitoring system for smart environments. *Sustainability*, 11(19), 5355. <https://doi.org/10.3390/su11195355>
- Semtech Corporation. (2024). *LoRa® and LoRaWAN®*. Semtech. <https://www.semtech.com/uploads/technology/LoRa/lora-and-lorawan.pdf>
- Sinha, R. S., Wei, Y., & Hwang, S. H. (2017). A survey on LPWA technology: LoRa and NB-IoT. *ICT Express*, 3(1), 14-21. <https://doi.org/10.1016/j.icte.2017.03.004>
- Smith, C. B., & Parmenter, K. E. (2016). *Energy management principles* (2nd ed.). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802506-2.00001-X>
- Sornin, N., Luis, M., Eirich, T., Kramp, T., & Hersent, O. (2015). *LoRaWAN™ Specification*. LoRa Alliance Inc. https://loro-alliance.org/wp-content/uploads/2020/11/2015_-_lorawan_specification_1r0_611_1.pdf
- Termsawasd, S., & Chaiyakul, Y. (2024). Energy consumptions in university case study: Rajabhat Maha Sarakham University [In Thai]. *Journal of Architecture, Design and Construction*, 6(1), 52-65. <https://so02.tci-thaijo.org/index.php/Jadc/article/view/262506>
- Thirunavukkarasu, K., & Raju, L. (2025). Enhanced energy efficiency smart buildings through LoRaWAN and adaptive machine learning techniques. *Wireless Networks*, 31(3), 2875-2892. <https://doi.org/10.1007/s11276-025-03915-5>
- Turner, W. C., & Doty, S. (2006). *Energy management handbook* (6th ed.). The Fairmount Press.

