



ประเมินความเที่ยงตรงการวัดคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแพลตฟอร์มโนดเรด
และเซ็นเซอร์ PZEM-004T สำหรับระบบต้นแบบแสดงผลพลังงานไฟฟ้า
ค่าไฟฟ้า และคาร์บอนฟุตพริ้นท์ในแบบจำลองบ้านพักอาศัย
ACCURACY ASSESSMENT OF ELECTRICAL PARAMETER MEASUREMENT OF
NODE-RED PLATFORM AND PZEM-004T SENSOR FOR A PROTOTYPE
SYSTEM OF ENERGY, ELECTRICITY COST, AND CARBON FOOTPRINT
DISPLAY IN A RESIDENTIAL HOUSE MODEL

พิชชาภา อินจู้¹ สุพรรณษา พงษ์พันธ์¹ และนัฐพงษ์ เนินชัด^{1*}

¹หลักสูตรเทคโนโลยีไฟฟ้า คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์

Pichapa Inju¹ Supansa Phongpan¹ and Nattapong Nernchad^{1*}

¹Program in Electrical Technology, Faculty of Industrial Technology, Uttaradit Rajabhat University

*Corresponding author e-mail: nattapong.ner@uru.ac.th

วันที่รับ : 1 กันยายน 2568

Received : September 1, 2025

วันที่แก้ไข : 21 มิถุนายน 2569

Revised : June 21, 2026

วันที่ตอบรับ : 30 มิถุนายน 2569

Accepted : June 30, 2026

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาและประเมินความเที่ยงตรงของระบบต้นแบบสำหรับการวัดคุณลักษณะทางไฟฟ้า การแสดงผลพลังงานไฟฟ้า ค่าไฟฟ้า และคาร์บอนฟุตพริ้นท์ รวมถึงการควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้าผ่านแพลตฟอร์มโนดเรดร่วมกับเซ็นเซอร์ PZEM-004T ในแบบจำลองบ้านพักอาศัย ระบบต้นแบบติดตั้งเซ็นเซอร์ PZEM-004T จำนวน 5 จุด เพื่อวัดค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของวงจรหลักและวงจรร้อย ข้อมูลที่วัดได้ถูกส่งไปยังแพลตฟอร์มโนดเรดสำหรับแสดงผลแบบเรียลไทม์ การทดลองประกอบไปด้วยการทดสอบความถูกต้องของการสื่อสารข้อมูล การทดสอบการควบคุมโหลดไฟฟ้า การประเมินความเที่ยงตรงของเซ็นเซอร์โดยเปรียบเทียบกับมัลติมิเตอร์มาตรฐาน และการแสดงผลค่าไฟฟ้ากับคาร์บอนฟุตพริ้นท์ ผลการทดลองพบว่า การสื่อสารข้อมูลระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์กับโนดเรดมีความถูกต้องอยู่ในช่วง 97-100 เปอร์เซ็นต์ และระบบสามารถควบคุมการเปิด-ปิดโหลดผ่านแดชบอร์ดได้ ผลการประเมินความเที่ยงตรงของเซ็นเซอร์พบว่า ค่าความคลาดเคลื่อนของกระแสไฟฟ้าอยู่ในช่วง 0.00 ถึง 33.33 เปอร์เซ็นต์ และค่าความคลาดเคลื่อนของกำลังไฟฟ้าอยู่ในช่วง 0.01 ถึง 47.10 เปอร์เซ็นต์ โดยค่าความคลาดเคลื่อนสูงพบในกรณีโหลดขนาดเล็กและเครื่องทำน้ำอุ่น ซึ่งมีกำลังไฟฟ้าคลาดเคลื่อนสูงสุด 47.10 เปอร์เซ็นต์ และ 25.54 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ขณะที่โหลดขนาดกลางมีค่าความคลาดเคลื่อนของกำลังไฟฟ้า 1.33 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้แดชบอร์ดของโนดเรดสามารถแสดงผลพลังงานไฟฟ้า ค่าไฟฟ้า และคาร์บอนฟุตพริ้นท์แบบต่อเนื่อง

คำสำคัญ : โนดเรด, เซ็นเซอร์ PZEM-004T, คาร์บอนฟุตพริ้นท์, ค่าไฟฟ้า

Abstract

This study aims to develop and evaluate the measurement accuracy of a prototype system for measuring electrical characteristics, displaying electrical energy consumption, electricity cost, and carbon footprint, and controlling electrical devices through the Node-RED platform integrated with PZEM-004T sensors in a residential house model. The prototype system was equipped with five PZEM-004T sensors to measure the electrical parameters of the main circuit and branch circuits. The measured data were then transmitted to the Node-RED platform for real-time visualization. The experiments included tests of data communication accuracy, electrical load control, sensor accuracy through comparison with a standard multimeter, and the display of electricity cost and carbon footprint. The experimental results showed that the accuracy of data communication between the microcontroller and Node-RED ranged from 97% to 100%, and the system successfully controlled the switching of electrical loads through the dashboard. The sensor accuracy evaluation indicated that the current measurement error ranged from 0.00% to 33.33%, whereas the power measurement error ranged from 0.01% to 47.10%. High measurement errors were observed for low-power loads and the water heater, with maximum power measurement errors of 47.10% and 25.54%, respectively. In contrast, the medium-power load exhibited a power measurement error of 1.33%. In addition, the Node-RED dashboard continuously displays electrical energy consumption, electricity cost, and carbon footprint.

Keywords : Node-RED, PZEM-004T, Carbon Footprint, Electricity Costs

1. บทนำ

ในยุคสมัยที่มีความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทั้งในภาคอุตสาหกรรมและครัวเรือน ส่งผลให้ค่าใช้จ่ายด้านพลังงานและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมีความรุนแรงมากขึ้น การใช้พลังงานอย่างไม่มีประสิทธิภาพก่อให้เกิดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก โดยเฉพาะคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่อการเกิดภาวะโลกร้อนและการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ การพัฒนาระบบที่ช่วยให้ผู้ใช้ไฟฟ้าสามารถติดตาม ตรวจสอบ และควบคุมการใช้พลังงานได้อย่างต่อเนื่อง จึงเป็นแนวทางสำคัญเพื่อลดค่าใช้จ่ายและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

แพลตฟอร์มโนดเรด (Node-RED) ได้รับความสนใจอย่างกว้างขวางในการเป็นเครื่องมือ IoT ที่สามารถเชื่อมโยงอุปกรณ์ตรวจวัดไฟฟ้าเข้ากับระบบ แสดงผลแบบเรียลไทม์ได้ งานวิจัยหลายชิ้นได้นำโนดเรดไปใช้งานในบริบทด้านพลังงานที่หลากหลาย เช่น Wongwut & Angamnaysiri (2024) ได้พัฒนาระบบตรวจสอบพลังงานแบบเรียลไทม์โดยใช้โมดูล ESP8266 และ PZEM-004T ซึ่งมีความแม่นยำในการวัดภายในเฉลี่ย 1 เปอร์เซ็นต์ และช่วยลดค่าไฟฟ้าผ่านอัตราค่าไฟฟ้าตามช่วงเวลา ในงานอุตสาหกรรม Khasawneh et al. (2025) ได้บูรณาการโนดเรดเข้ากับโปรโตคอล MQTT และมีเตอร์ย่อยเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของระบบ HVAC และเครื่องทำความเย็น ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานและการตรวจจับข้อบกพร่องระบบ Omid et al. (2023) ใช้โนดเรดพัฒนาระบบ SCADA เพื่อควบคุมระบบพลังงานหมุนเวียนแบบผสม โดยสามารถควบคุมแบตเตอรี่และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซลได้อย่างยืดหยุ่น ในด้านการจัดการพลังงานอาคาร Chen et al. (2024) ได้นำโนดเรดมาใช้ในระบบไฟส่องสว่างอัจฉริยะ



และการตรวจสอบสภาพแวดล้อมแบบเรียลไทม์ ขณะที่ Sharan et al. (2023) ได้แสดงให้เห็นว่าแพลตฟอร์มโนดเรตสามารถส่งเสริมพฤติกรรมการใช้พลังงานไฟฟ้าของผู้บริโภค Zidni et al. (2024) ได้สร้างระบบตรวจสอบ CO และ CO₂ พร้อมการแจ้งเตือนตามเกณฑ์ผ่านแดชบอร์ดโนดเรต Bonavolontà et al. (2025) ได้สร้างแพลตฟอร์มโนดเรตเพื่อติดตามการใช้งานพลังงานสำหรับชุมชนพลังงานหมุนเวียน

แม้ว่างานวิจัยที่ผ่านมาทำให้ทราบศักยภาพของโนดเรตในการเป็นแพลตฟอร์ม IoT เพื่อการตรวจสอบและจัดการพลังงาน แต่ยังมีข้อจำกัดคือ ส่วนใหญ่เน้นในภาคอุตสาหกรรมหรืออาคารขนาดใหญ่ ขณะที่การใช้งานในบริบทของบ้านพักอาศัยยังมีการศึกษาอย่างจำกัด อีกทั้งระบบที่พัฒนาขึ้นยังมุ่งเฉพาะการตรวจวัดพารามิเตอร์ไฟฟ้า แต่ยังขาดการบูรณาการการคำนวณค่าไฟฟ้าและคาร์บอนฟุตพริ้นท์ นอกจากนี้เซ็นเซอร์ PZEM-004T แม้เป็นอุปกรณ์ราคาประหยัดที่นิยมใช้งาน แต่ยังคงงานวิจัยที่ประเมินความเที่ยงตรงของเซ็นเซอร์นี้เมื่อใช้งานจริงในระบบบ้านพักอาศัยโดยเปรียบเทียบกับอุปกรณ์มาตรฐาน

งานวิจัยนี้จึงมีเป้าหมายในการสร้างระบบต้นแบบที่สามารถตรวจวัดและควบคุมการใช้พลังงานไฟฟ้าในบ้านพักอาศัยแบบเรียลไทม์ รวมถึงการประเมินความเที่ยงตรงของเซ็นเซอร์ PZEM-004T พร้อมทั้งคำนวณค่าไฟฟ้า และคาร์บอนฟุตพริ้นท์ ซึ่งจะทำให้เจ้าของบ้านพักอาศัยได้ตระหนักถึงการใช้พลังงานไฟฟ้าอย่างคุ้มค่าและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมทางอ้อม

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อพัฒนาและประเมินความเที่ยงตรงของระบบต้นแบบสำหรับการวัดคุณลักษณะทางไฟฟ้า การแสดงผลพลังงานไฟฟ้า ค่าไฟฟ้า และคาร์บอนฟุตพริ้นท์ รวมถึงการควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้าผ่านแพลตฟอร์มโนดเรตร่วมกับเซ็นเซอร์ PZEM-004T ในแบบจำลองบ้านพักอาศัย

3. ขอบเขตของการวิจัย

3.1 ใช้แบบจำลองบ้านพักอาศัยสองชั้นที่ติดตั้งวงจรย่อย 4 วงจร ได้แก่ วงจรแสงสว่างชั้นล่าง วงจรแสงสว่างชั้นบน วงจรเตารีด และวงจรเครื่องทำน้ำอุ่น

3.2 ติดตั้งเซ็นเซอร์ PZEM-004T จำนวน 5 จุด เพื่อวัดแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า

3.3 ใช้แพลตฟอร์มโนดเรตเป็นเครื่องมือแสดงผลข้อมูลไฟฟ้า ค่าไฟฟ้า และคาร์บอนฟุตพริ้นท์แบบเรียลไทม์

3.4 วิเคราะห์ความเที่ยงตรงของเซ็นเซอร์ด้วยการเปรียบเทียบกับมัลติมิเตอร์ และคำนวณค่าความคลาดเคลื่อน

4. วิธีดำเนินการวิจัย

4.1 การประเมินค่าไฟฟ้า

การคำนวณค่าไฟฟ้าได้ดำเนินการตามขั้นตอนของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, 2561) โดยเริ่มจากการคำนวณค่าพลังงานไฟฟ้าในหน่วยกิโลวัตต์-ชั่วโมง (kWh) ตามกำลังไฟฟ้าที่ใช้งานและระยะเวลาในการใช้งาน ดังสมการที่ (1)

$$E = P \times t \quad (1)$$

เมื่อ E คือ พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ไป (kWh),

P คือ กำลังไฟฟ้า (kW)

t คือ ระยะเวลาใช้งาน (ชั่วโมง)

จากนั้นจึงคำนวณค่าไฟฟ้าฐาน โดยนำพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ไปคูณกับอัตราค่าไฟฟ้าต่อหน่วย และบวกกับค่าบริการรายเดือน ดังสมการที่ (2)

$$C_{base} = E \times R + S \quad (2)$$

เมื่อ C_{base} คือ ค่าไฟฟ้าฐาน (บาท)
 R คือ อัตราค่าไฟฟ้าต่อหน่วย (บาท/kWh)
 S คือ ค่าบริการ (บาท/เดือน)

ถัดมาเป็นการคำนวณค่าไฟฟ้าผันแปร (Ft) ซึ่งเป็นตัวแปรที่กำหนดโดยการไฟฟ้า โดยมีสมการดังนี้

$$C_{Ft} = E \times F_t \quad (3)$$

เมื่อ C_{Ft} คือ ค่าไฟฟ้าผันแปร (บาท)
 F_t คือ การปรับค่าไฟฟ้าอัตโนมัติ (บาท/kWh)

ในขั้นต่อไปคำนวณภาษีมูลค่าเพิ่ม (VAT 7 เปอร์เซ็นต์) ซึ่งคำนวณจากผลรวมของค่าไฟฟ้าฐาน และค่าไฟฟ้าผันแปร ดังสมการที่ (4)

$$C_{vat} = (C_{base} + C_{Ft}) \times 0.07 \quad (4)$$

ค่าบริการที่ผู้ใช้ไฟฟ้าต้องจ่ายจริงต่อเดือนคือ ผลรวมของค่าไฟฟ้าฐาน ค่า Ft และค่าภาษีมูลค่าเพิ่ม ดังสมการที่ (5)

$$C_{total} = C_{base} + C_{Ft} + C_{vat} \quad (5)$$

4.2 การประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์

ภาวะโลกร้อน (Global Warming: GW) เกิดจากการสะสมของก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse Gases: GHGs) ในชั้นบรรยากาศ ซึ่งก๊าซเหล่านี้มีคุณสมบัติในการดูดซับและกักเก็บพลังงานความร้อน ส่งผลให้อุณหภูมิเฉลี่ยของโลกเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง (มนนภา เทพสุด และชนิษฐา ชัยรัตนาวรรณ, 2567) ก๊าซเรือนกระจก เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) มีเทน (CH₄) และไนตรัสออกไซด์ (N₂O) ก่อภาวะโลกร้อนที่แตกต่างกันกล่าวคือ CH₄ มีค่า GWP เท่ากับ 28 และ N₂O มีค่า GWP เท่ากับ 265 เมื่อเทียบกับ CO₂ ที่มีค่า GWP เท่ากับ 1 (จิรพันธ์ จันฤชัย และคณะ, 2568)

การผลิตพลังงานไฟฟ้าที่ใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล เช่น ก๊าซธรรมชาติ ถ่านหิน และน้ำมัน ถือเป็นแหล่งปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่สำคัญในภาคพลังงานของประเทศไทย (สัดส่วนกว่า 69 เปอร์เซ็นต์ ของการปล่อยทั้งหมด) (จิรพันธ์ จันฤชัย และคณะ, 2568) การคำนวณผลกระทบของกิจกรรมที่ก่อให้เกิดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกสามารถอธิบายด้วยคาร์บอนฟุตพริ้นท์ (Carbon Footprint: CFP) ซึ่งสะท้อนปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั้งหมดที่เกิดจากกิจกรรมหรือผลิตภัณฑ์ในหน่วยคาร์บอนไดออกไซด์สมมูล (CO₂eq) (ธิปดินทร์ แสงสว่าง และคณะ, 2559 ; รุ่งนภา จิรวัฒน์สมพร และบุษราคัม จิตานวัณณ์, 2568)

อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้ไม่ได้คำนวณปริมาณการปล่อย CO₂, CH₄ และ N₂O แยกเป็นรายชนิด เนื่องจากขอบเขตของงานมุ่งประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์จากการใช้พลังงานไฟฟ้าในแบบจำลองบ้านพักอาศัย ดังนั้น การคำนวณจึงใช้ค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการผลิตไฟฟ้า (EF_{elec}) ดังสมการที่ (6)

$$CFP_{elec} = E \times EF_{elec} \quad (6)$$



เมื่อ CFP_{elec} คือ คาร์บอนฟุตพริ้นท์จากการใช้ไฟฟ้า (kgCO_2e) และ EF_{elec} คือ ค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการผลิตไฟฟ้า ($\text{kgCO}_2\text{e/kWh}$) (การุณย์ ชัยวนิชย์ และพุทธิ อุบลสุข, 2561)

4.3 การประเมินความเที่ยงตรงของเซ็นเซอร์

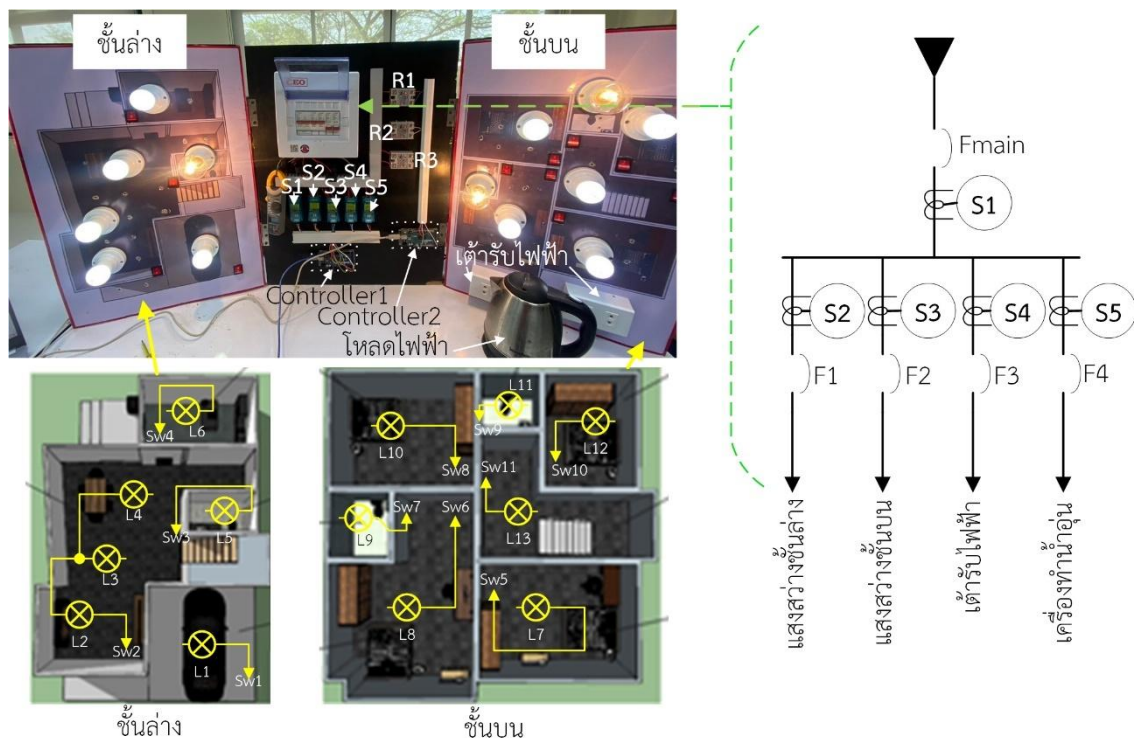
การเปรียบเทียบค่าทางไฟฟ้าที่วัดจากเซ็นเซอร์ PZEM-004T กับมัลติมิเตอร์โดยหาค่าความผิดพลาด (Error) ของเซ็นเซอร์จากการคำนวณดังสมการที่ (7)

$$\text{Error}(\%) = \frac{|X_{\text{sensor}} - X_{\text{ref}}|}{X_{\text{ref}}} \times 100 \quad (7)$$

โดยที่ X_{sensor} คือ ค่าที่วัดได้จาก PZEM-004T และ X_{ref} คือ ค่ามาตรฐานจากมัลติมิเตอร์

4.4 อุปกรณ์

เริ่มจากการสร้างต้นแบบจำลองบ้านพักอาศัยสองชั้นดังภาพที่ 1 ประกอบด้วยการจำลองโหลดไฟฟ้าแสงสว่างชั้นล่างและชั้นบน ชั้นล่างติดตั้งหลอดไฟ L1 ถึง L6 และสวิตช์ควบคุม Sw1 ถึง Sw4 ชั้นบนติดตั้งหลอดไฟ L7 ถึง L13 และสวิตช์ควบคุม Sw5 ถึง Sw11 รวมถึงได้รับไฟฟ้าสำหรับโหลดไฟฟ้า ตู้รับไฟ ทำหน้าที่ควบคุมโหลดทางไฟฟ้าทั้งหมดของบ้านจำลองโดยมี Fmain คือ เบรกเกอร์หลักพร้อมเบรกเกอร์ย่อย F1 ถึง F4 เบรกเกอร์ย่อย F1 ควบคุมวงจรแสงสว่างชั้นล่าง เบรกเกอร์ย่อย F2 ควบคุมวงจรแสงสว่างชั้นบน เบรกเกอร์ย่อย F3 ควบคุมวงจรตู้รับไฟและเบรกเกอร์ย่อย F4 ควบคุมเครื่องทำน้ำอุ่น



ภาพที่ 1 แบบจำลองบ้านพักอาศัย

เบรกเกอร์ทุกตัวได้รับการติดตั้งเซ็นเซอร์ PZEM-004T (S1 ถึง S5) เพื่อวัดแรงดัน กระแส กำลังไฟฟ้า และพลังงานไฟฟ้า โดยมีบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์หนึ่ง Arduino Mega2560 (Controller 1) อ่านค่าจาก

S1 ถึง S5 เพื่อส่งข้อมูลต่อไป ขณะที่บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์สอง (Controller 2) ทำหน้าที่ควบคุมหลอดไฟ L6 ผ่านรีเลย์ R1 ควบคุมหลอดไฟ L9 ผ่านรีเลย์ R2 และควบคุมหลอดไฟ L11 ผ่านรีเลย์ R3

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาแพลตฟอร์มโนดเรด (O'Leary, N. & Conway-Jones, D., 2026) ดังภาพที่ 2 (a) เพื่อใช้ในการแสดงพลังงานไฟฟ้า ค่าบริการไฟฟ้า และคาร์บอนฟุตพริ้นท์ อีกทั้งยังสามารถควบคุมการเปิดปิดหลอดไฟ L6 L9 และ L11 หน้าต่างแดชบอร์ดของโนดเรดใช้สำหรับการแสดงผลการวัดและคำนวณค่าพลังงานไฟฟ้า หน้าต่างหลัก (Home1) แสดงค่าพารามิเตอร์ไฟฟ้าในแต่ละวงจร ได้แก่ วงจรหลัก Fmain และวงจรย่อย F1 ถึง F4 โดยมีการแสดงค่าแรงดัน (Volt) ความถี่ (Hz), กระแส (Current) และกำลังไฟฟ้า (Power) สำหรับหน้าต่างที่สอง (Home2) แสดงข้อมูลวันและเวลา พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ (kWh) ค่าไฟฟ้า และค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ ซึ่งแสดงถึงผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมจากการใช้พลังงานไฟฟ้า

4.5 ขั้นตอนการทดสอบ

สำหรับขั้นตอนการทดลองแสดงดังต่อไปนี้

4.5.1 ติดตั้งสายสื่อสารยูเอสบีจากทั้งไมโครคอนโทรลเลอร์หนึ่งและสองไปยังคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลเพื่อเชื่อมต่อแพลตฟอร์มโนดเรด ดังภาพที่ 2 (b)

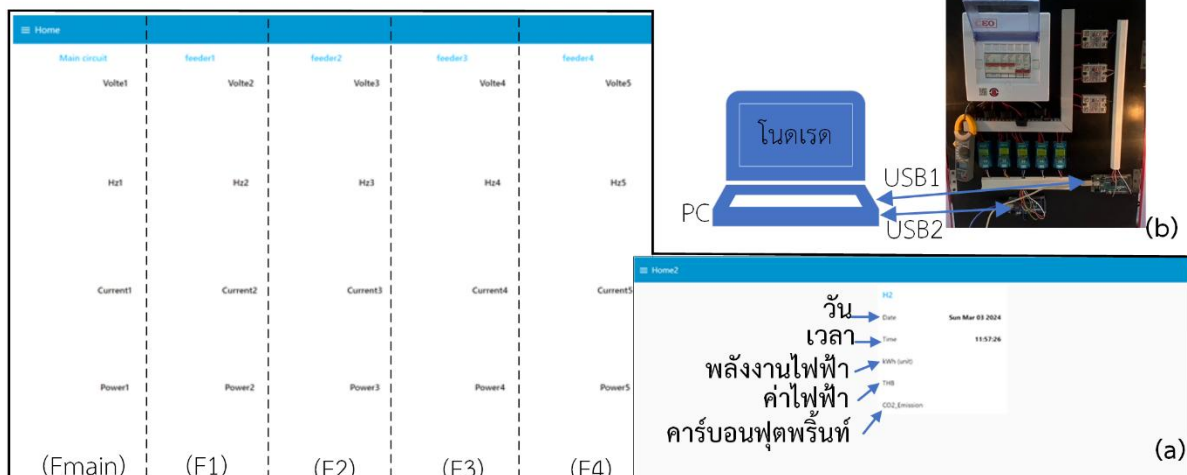
4.5.2 ติดตั้งเซ็นเซอร์ PZEM-004T (S1 ถึง S5) โดยที่เซ็นเซอร์ S1 ทำหน้าที่วัดพารามิเตอร์ไฟฟ้าของเบรกเกอร์หลัก Fmain เซ็นเซอร์ S2 ทำหน้าที่วัดพารามิเตอร์ไฟฟ้าของเบรกเกอร์ F1 เซ็นเซอร์ S3 ทำหน้าที่วัดพารามิเตอร์ไฟฟ้าของเบรกเกอร์ F2 เซ็นเซอร์ S4 ทำหน้าที่วัดพารามิเตอร์ไฟฟ้าของเบรกเกอร์ F3 และเซ็นเซอร์ S5 ทำหน้าที่วัดพารามิเตอร์ไฟฟ้าของเบรกเกอร์ F4 ตามลำดับ จากนั้นนำเซ็นเซอร์ S1 ถึง S5 เชื่อมต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์หนึ่งผ่านช่องสัญญาณ RX และ TX เพื่อประมวลผลข้อมูลไปยังคอมพิวเตอร์ต่อไป สำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์สองเชื่อมต่อเข้ากับรีเลย์ R1 เพื่อควบคุมหลอดแสงสว่าง L6

4.5.3 ทดสอบความถูกต้องของการสื่อสารข้อมูลระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์และโนดเรด โดยเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ไฟฟ้าที่วัดได้จากเซ็นเซอร์ PZEM-004T กับค่าที่โนดเรดแสดงผล จากนั้นคำนวณค่าความคลาดเคลื่อน

4.5.4 ทดสอบการควบคุมหลอดแสงสว่าง L6 โดยสั่งงานเปิด-ปิดหลอดไฟผ่านแดชบอร์ด และตรวจวัดค่ากระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงเมื่อ L6 ทำงานหรือหยุดทำงาน

4.5.5 ทดสอบความเที่ยงตรงของเซ็นเซอร์ PZEM-004T โดยเปรียบเทียบค่าที่วัดได้กับมัลติมิเตอร์มาตรฐาน (รุ่น HD-3812A) แล้วคำนวณค่าความคลาดเคลื่อน

4.5.6 ทดสอบแสดงผลค่าไฟฟ้าและคาร์บอนฟุตพริ้นท์ โดยนำค่าพลังงานไฟฟ้า (kWh) ที่วัดได้ไปคำนวณค่าไฟฟ้าและคำนวณค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์



ภาพที่ 2 (a) หน้าต่างแดชบอร์ดของโนดเรด (b) ติดตั้งการทดลอง

5. ผลการวิจัย

5.1 ผลการทดสอบการสื่อสารระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์กับโนดเรด

ตารางที่ 1 ถึง 5 แสดงให้เห็นความเที่ยงตรงในการสื่อสารข้อมูลระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์กับโนดเรด พบว่ามีค่าความถูกต้องใกล้เคียงกัน โดยมีความแตกต่างเพียงเล็กน้อยระหว่างค่าที่อ่านได้จากทั้งสองอุปกรณ์ซึ่งค่าความถูกต้องการสื่อสารอยู่ที่ 97-100 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ไฟฟ้าของเบรกเกอร์หลัก Fmain

ปริมาณทางไฟฟ้า	Arduino	Node-Red	ความถูกต้อง
แรงดันไฟฟ้า (V)	234.40	227.00	98%
กระแสไฟฟ้า (A)	11.40	11.40	100%
กำลังไฟฟ้า (W)	2,672.16	2,587.80	97%
ความถี่ (Hz)	50.00	50.00	100%

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ไฟฟ้าของเบรกเกอร์หลัก F1

ปริมาณทางไฟฟ้า	Arduino	Node-Red	ความถูกต้อง
แรงดันไฟฟ้า (V)	234.40	234.30	99%
กระแสไฟฟ้า (A)	0.06	0.06	100%
กำลังไฟฟ้า (W)	14.06	14.06	100%
ความถี่ (Hz)	50.00	50.00	100%

ตารางที่ 3 พารามิเตอร์ไฟฟ้าของเบรกเกอร์หลัก F2

ปริมาณทางไฟฟ้า	Arduino	Node-Red	ความถูกต้อง
แรงดันไฟฟ้า (V)	234.40	234.30	99%
กระแสไฟฟ้า (A)	0.07	0.07	100%
กำลังไฟฟ้า (W)	16.41	16.40	100%
ความถี่ (Hz)	50.00	50.00	100%

ตารางที่ 4 พารามิเตอร์ไฟฟ้าของเบรกเกอร์หลัก F3

ปริมาณทางไฟฟ้า	Arduino	Node-Red	ความถูกต้อง
แรงดันไฟฟ้า (V)	225.60	225.80	99%
กระแสไฟฟ้า (A)	6.49	6.44	98%
กำลังไฟฟ้า (W)	1,461.14	1,454.15	99%
ความถี่ (Hz)	50.00	49.90	99%

ตารางที่ 5 พารามิเตอร์ไฟฟ้าของเบรกเกอร์หลัก F4

ปริมาณทางไฟฟ้า	Arduino	Node-Red	ความถูกต้อง
แรงดันไฟฟ้า (V)	225.60	227.30	99%
กระแสไฟฟ้า (A)	16.08	16.09	99%
กำลังไฟฟ้า (W)	3,627.65	3,657.26	99%
ความถี่ (Hz)	50.00	50.00	100%

5.2 ทดลองการควบคุมผ่านแพลตฟอร์มโนดเรด

การทดลองนี้แสดงการควบคุมเปิดปิดหลอดไฟ L6 ผ่านแดชบอร์ดบนแพลตฟอร์มโนดเรด ซึ่งจะแสดงให้เห็นว่าสามารถเปิดปิดแสงสว่าง L6 ได้ ในห้องน้ำจำลองดังตารางที่ 6 นั่นคือ เมื่อทำการสั่งเปิดแสงสว่างทำให้มีค่ากระแสเท่ากับ 0.52 A ขณะที่เมื่อทำการสั่งปิดแสงสว่างทำให้รีเลย์เปิดวงจรไฟฟ้าส่งผลให้มีค่ากระแสเท่ากับ 0.08 A

ตารางที่ 6 ผลการสั่งการควบคุมแสงสว่าง L6

ปริมาณทางไฟฟ้า	ค่าที่บันทึกจากการสั่งเปิดแสงสว่าง	ค่าที่บันทึกจากการสั่งปิดแสงสว่าง
กระแสไฟฟ้า (A)	0.52	0.08

5.3 ทดสอบความเที่ยงตรงในการวัดของเซ็นเซอร์ PZEM-004T

หัวข้อนี้แยกการทดสอบออกเป็น 5 กรณีเพื่อวัดค่ากระแสไฟฟ้าและพลังงานไฟฟ้าของเซ็นเซอร์แต่ละตัวเทียบกับมัลติมิเตอร์ กรณีที่ 1 ดังตารางที่ 7 โดยการจำลองสถานการณ์เปิดเบรกเกอร์ทั้งหมดภายในบ้าน จากนั้นอ่านค่าจากเซ็นเซอร์ S1 ซึ่งค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้คือ 12.23 A กำลังไฟฟ้าวัดค่าได้ 2,090.30 W จากผลนี้แสดงให้เห็นว่าเซ็นเซอร์ PZEM-004T และมัลติมิเตอร์ HD-3812A มีการวัดค่าไฟฟ้าที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งสามารถยอมรับค่าความผิดพลาดได้ในการใช้งานจริง กรณีที่ 2 อ่านค่าจากเซ็นเซอร์ S2 ซึ่งจำลอง



สถานการณ์เปิดสวิตช์แสงสว่าง Sw1 ถึง Sw4 ดังตารางที่ 8 ค่ากระแสไฟฟ้าวัดค่าเท่ากับ 0.06 A กำลังไฟฟ้าวัดได้ 13.06 W

ตารางที่ 7 กรณีที่ 1 เมื่อเปิดเซอร์กิตเบรกเกอร์ Fmain และ F1 ถึง F4

ปริมาณทางไฟฟ้า	เซ็นเซอร์ S1	มัลติมิเตอร์ รุ่น HD-3812A	Error (%)
กระแสไฟฟ้า (A)	12.23	11.78	3.82%
กำลังไฟฟ้า (W)	2,090.60	2,090.30	0.01%

ตารางที่ 8 กรณีที่ 2 เมื่อเปิดสวิตช์แสงสว่าง Sw1-Sw4

ปริมาณทางไฟฟ้า	เซ็นเซอร์ S2	มัลติมิเตอร์ รุ่น HD-3812A	Error (%)
กระแสไฟฟ้า (A)	0.06	0.06	0.00
กำลังไฟฟ้า (W)	11.80	13.80	14.49

ตารางที่ 9 กรณีที่ 3 เมื่อเปิดสวิตช์แสงสว่าง Sw5-Sw11

ปริมาณทางไฟฟ้า	เซ็นเซอร์ S3	มัลติมิเตอร์ รุ่น HD-3812A	Error (%)
กระแสไฟฟ้า (A)	0.07	0.06	16.67
กำลังไฟฟ้า (W)	13.40	13.80	2.90

ตารางที่ 10 กรณีที่ 4 เมื่อเปิดเบรกเกอร์ย่อย F3 ที่ควบคุมวงจรเต้ารับที่ 1 ต่อกับพัดลม 45 W และเต้ารับที่ 2 ต่อกับกาต้มน้ำ 1,500 W

ปริมาณทางไฟฟ้า	เซ็นเซอร์ PZEM-004T	มัลติมิเตอร์ รุ่น HD-3812A	Error (%)
เต้ารับไฟฟ้าตัวที่ 1			
กระแสไฟฟ้า (A)	0.08	0.06	33.33
กำลังไฟฟ้า (W)	7.30	13.80	47.10
เต้ารับไฟฟ้าตัวที่ 2			
กระแสไฟฟ้า (A)	6.30	6.12	2.94
กำลังไฟฟ้า (W)	1,426.27	1,407.60	1.33

ตารางที่ 11 กรณีที่ 5 เมื่อเปิดเบรกเกอร์ย่อย F4 ที่ควบคุมวงจรเครื่องทำน้ำอุ่น 3,500 W

ปริมาณทางไฟฟ้า	เซ็นเซอร์ S5	มัลติมิเตอร์ รุ่น HD-3812A	Error (%)
กระแสไฟฟ้า (A)	12.23	11.75	4.09
กำลังไฟฟ้า (W)	2,012.20	2,702.50	25.54

กรณีที่ 3 อ่านค่าจากเซ็นเซอร์ S3 โดยการจำลองสถานการณ์เปิดสวิตช์แสงสว่าง Sw5 ถึง Sw11 ดังตารางที่ 9 ค่ากระแสไฟฟ้าวัดได้ 0.07 A กำลังไฟฟ้าวัดได้ 13.80 W กรณีที่ 4 อ่านค่าจากเซ็นเซอร์ S4 ดังตารางที่ 10 วัดปริมาณไฟฟ้าเมื่อเตารีดที่ 1 ต่อกับพัดลม 45 W และเตารีดที่ 2 ต่อกับกาต้มน้ำ 1,500 W ผลการทดลองเตารีดตัวที่ 1 ค่ากระแสไฟฟ้าวัดได้ 0.08 A กำลังไฟฟ้าวัดได้ 7.30 W เตารีดตัวที่ 2 กระแสไฟฟ้าวัดได้ 6.30 A กำลังไฟฟ้าวัดได้ 1,426.27 W และกรณีที่ 5 อ่านค่าจากเซ็นเซอร์ S5 ดังตารางที่ 11 เมื่อเปิดเบรกเกอร์ย่อย F4 ที่ต่อกับเครื่องทำน้ำอุ่น 3,500 W โดยค่ากระแสไฟฟ้าเซ็นเซอร์วัดได้ 12.23 A กำลังไฟฟ้าเซ็นเซอร์วัดได้ 2,012.20 W สังเกตได้ว่าการวัดกระแสไฟฟ้ามีความคลาดเคลื่อนน้อย แต่การวัดกำลังไฟฟ้าที่มีการใช้งานโหลดขนาดใหญ่เช่นเครื่องทำน้ำอุ่นส่งผลต่อค่าความคลาดเคลื่อนที่เพิ่มขึ้น

5.4 ทดลองการแสดงผลสัญญาณทางไฟฟ้า ค่าไฟฟ้า และคาร์บอนฟุตพริ้นท์แบบต่อเนื่องของ เซ็นเซอร์ S1

การคำนวณค่าพลังงานไฟฟ้า ค่าไฟฟ้า และคาร์บอนฟุตพริ้นท์ ได้ใช้พารามิเตอร์จากเซ็นเซอร์ S1 เพราะเป็นเซ็นเซอร์ที่วัดพลังงานรวมทั้งหมดของบ้านจำลอง จากผลการทดลองในภาพที่ 3 (a) และ (b) แสดงการวัดปริมาณไฟฟ้า และการคำนวณคาร์บอนฟุตพริ้นท์ ในช่วงเวลาตั้งแต่ 18:29:00 ถึง 18:34:01 น. ภาพที่ 3 (a) ค่าแรงดันไฟฟ้าค่อนข้างคงที่ในช่วง 222 ถึง 222.2 V สอดคล้องกับมาตรฐานแรงดันไฟฟ้า ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงในช่วงเวลาสั้น ๆ เพียงเล็กน้อย แสดงถึงความเสถียรของระบบ กระแสไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงในช่วง 15.00-15.02 A โดยมีการแปรผันบางช่วง กำลังไฟฟ้ามีค่าเฉลี่ยที่ 2,937 W และมีการแกว่งตัวเล็กน้อยในช่วง 2,930-2,940 W ซึ่งบ่งชี้ว่าระบบกำลังใช้งานโหลดไฟฟ้าที่ค่อนข้างคงที่ และความถี่มีค่าเฉลี่ยคงที่อยู่ที่ 50 Hz ซึ่งเป็นค่ามาตรฐานของระบบไฟฟ้าในประเทศไทย ภาพที่ 3 (b) แสดงค่าไฟฟ้า และคาร์บอนฟุตพริ้นท์แบบต่อเนื่อง ค่ากิโลวัตต์ชั่วโมง (kWh) จาก 0.00 kWh ที่เวลา 18:29:00 ไปเป็น 0.26 kWh ที่เวลา 18:34:01 แสดงให้เห็นว่าในช่วงเวลา 5 นาที ค่าไฟฟ้า (C_{total}) เพิ่มขึ้นจาก 40.89 บาท ไปเป็น 41.89 บาท และคาร์บอนฟุตพริ้นท์ (CFP_{elec}) เพิ่มขึ้นจาก 0.00 kgCO_{2e} ไปเป็น 0.14 kgCO_{2e} ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการใช้พลังงานไฟฟ้าส่งผลต่อการปล่อยก๊าซเรือนกระจก

6. อภิปรายผล

ผลการทดสอบการสื่อสารข้อมูลระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์กับแพลตฟอร์มโนดเรดในตารางที่ 1 ถึงตารางที่ 5 แสดงให้เห็นว่า ค่าความถูกต้องของข้อมูลอยู่ในช่วง 97-100 เปอร์เซ็นต์ ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าระบบต้นแบบสามารถส่งข้อมูลค่าพารามิเตอร์ไฟฟ้าจากเซ็นเซอร์ PZEM-004T ผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์ไปยังแดชบอร์ดได้ค่อนข้างสอดคล้องกับงานวิจัยที่พัฒนาระบบตรวจสอบพลังงานแบบเรียลไทม์โดยใช้ NodeMCU PZEM-004T และระบบคลาวด์ร่วมกับโนดเรด (Wongwut & Angamnuaesiri, 2024) รวมถึงงานวิจัยที่ใช้ ESP8266 และ PZEM-004T เพื่อวัดพลังงานและแสดงข้อมูลผ่านสมาร์ตโฟนหรือเว็บ (Chaiyong & Sonasang, 2022) ผลการควบคุมโหลดไฟฟ้า (ทดสอบเฉพาะโหลดแสงสว่าง L6) ผ่านแพลตฟอร์มโนดเรด ในตารางที่ 6 แสดงให้เห็นว่าระบบต้นแบบสามารถควบคุมโหลดไฟฟ้าผ่านแดชบอร์ดได้ซึ่งมีทิศทางเดียวกับงานวิจัยที่พัฒนาระบบควบคุมปลั๊กไฟและแสดงผลผ่านสมาร์ตโฟนที่ใช้ NodeMCU PZEM-004T และ Blynk (ภาณุมาศ ทรัพย์ประกอบ และวรวิทย์ พันธรักษ์, 2567)

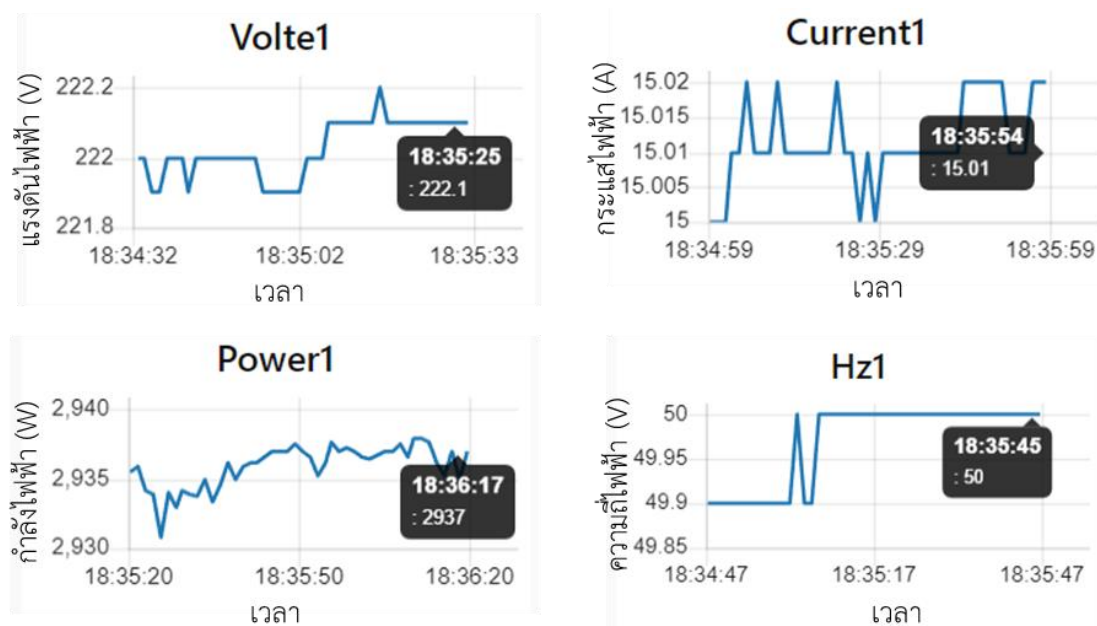
ผลการประเมินความเที่ยงตรงของเซ็นเซอร์ PZEM-004T เมื่อเปรียบเทียบกับมัลติมิเตอร์มาตรฐาน HD-3812A ในตารางที่ 7 ถึงตารางที่ 11 แสดงให้เห็นว่า ค่าความคลาดเคลื่อนขึ้นอยู่กับชนิดและขนาดของโหลด ในกรณีโหลดรวมของวงจรหลักตามตารางที่ 7 ค่าความคลาดเคลื่อนของกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 0.01 เปอร์เซ็นต์ และในกรณีกาต้มน้ำ 1,500 W ตามตารางที่ 10 ค่าความคลาดเคลื่อนของกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 1.33 เปอร์เซ็นต์ ผลดังกล่าวแสดงแนวโน้มว่า PZEM-004T สามารถให้ค่าการวัดที่ค่อนข้างใกล้เคียงกับ



เครื่องมือวัดอ้างอิง ในงานวิจัยบางเงื่อนไขของโหนดกำลังปานกลางซึ่งใช้ PZEM-004T v3.0 จำนวน 5 ตัว ในมิเตอร์ไฟฟ้าแบบ IoT แสดงค่าความคลาดเคลื่อนของแรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้าในระดับต่ำ และสามารถส่งข้อมูลไปยังคลาวด์พร้อมแสดงผลแบบเวลาจริงได้ (ณรงค์ชัย ดีสม และคณะ, 2568) ขณะที่งานวิจัย เครื่องวัดค่าไฟฟ้าผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ตรายงานการเปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดมาตรฐาน KYORITSU 6305 และใช้ค่าเฉลี่ยกับเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดในการประเมินผล (บรรจง แจ่มศรี และคณะ, 2567)

ในทางกลับกัน ผลการทดลองยังพบข้อจำกัดที่สำคัญในบางย่านโหนด โดยเฉพาะโหนดขนาดเล็ก และโหนดความร้อนขนาดใหญ่ ตารางที่ 10 แสดงว่าตัวรับตัวที่ 1 ซึ่งต่อกับพัดลม 45 W มีค่าความคลาดเคลื่อนของกำลังไฟฟ้า 47.10 เปอร์เซ็นต์และค่าความคลาดเคลื่อนของกระแสไฟฟ้า 33.33 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่ตารางที่ 11 แสดงว่าเครื่องทำน้ำอุ่น 3,500 W มีค่าความคลาดเคลื่อนของกระแสไฟฟ้าเพียง 4.09 เปอร์เซ็นต์ แต่ค่าความคลาดเคลื่อนของกำลังไฟฟ้าสูงถึง 25.54 เปอร์เซ็นต์ ความคลาดเคลื่อนในโหนดขนาดเล็กอาจเกี่ยวข้องกับย่านกระแสต่ำและความละเอียดของเซ็นเซอร์ เนื่องจากความแตกต่างของค่าที่อ่านได้เพียงเล็กน้อยสามารถทำให้เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสูงขึ้นได้ ส่วนกรณีเครื่องทำน้ำอุ่นความไม่สอดคล้องระหว่างเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของกระแสและกำลังไฟฟ้าอาจเกี่ยวข้องกับการคำนวณกำลังไฟฟ้าภายในเซ็นเซอร์ การอ่านค่าตัวประกอบกำลัง

เมื่อพิจารณาการแสดงผลค่าไฟฟ้าและคาร์บอนฟุตพริ้นท์ ภาพที่ 3 แสดงให้เห็นว่าในช่วงเวลา 18:29:00 ถึง 18:34:01 น. ค่าพลังงานไฟฟ้าเพิ่มจาก 0.00 เป็น 0.26 kWh ค่าไฟฟ้าเพิ่มจาก 40.89 เป็น 41.89 บาท และคาร์บอนฟุตพริ้นท์เพิ่มจาก 0.00 เป็น 0.14 kgCO₂e ผลดังกล่าวแสดงแนวโน้มว่าระบบสามารถนำค่าพลังงานไฟฟ้าที่วัดได้ไปแสดงผลเป็นค่าใช้จ่ายและผลกระทบต่อคาร์บอนได้อย่างต่อเนื่อง สอดคล้องกับงานด้านคาร์บอนฟุตพริ้นท์องค์กรซึ่งรายงานว่า การใช้พลังงานไฟฟ้าเป็นแหล่งปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางอ้อมที่สำคัญ (การุณย์ ชัยวนิชย์ และพุทธติ อุบลสุข, 2561 ; นฤมล พันธุ์ทวีทรัพย์ และคณะ, 2568)



(a)

H2	
Date	Thu Mar 07 2024
Time	18:29:00
kWh (unit)	0.00019340519453455384
THB	40.8961544334356
CO2_Emission	0.00010850031413388471



H2	
Date	Thu Mar 07 2024
Time	18:34:01
kWh (unit)	0.25697985857989836
THB	41.89782497650959
CO2_Emission	0.144165700663323

(b)

ภาพที่ 3 (a) แดชบอร์ดแสดงพารามิเตอร์ไฟฟ้า (b) แสดงปริมาณค่าไฟฟ้าและคาร์บอนฟุตพริ้นท์แบบต่อเนื่องเมื่อจับเวลา 18:29:00 - 18:34:01 น.

7. บทสรุป

งานวิจัยนี้พัฒนาและประเมินความเที่ยงตรงของระบบต้นแบบสำหรับการวัดคุณลักษณะทางไฟฟ้า การแสดงผลพลังงานไฟฟ้า ค่าไฟฟ้า คาร์บอนฟุตพริ้นท์ และการควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้าผ่านแพลตฟอร์มโนดเรด ร่วมกับเซ็นเซอร์ PZEM-004T ในแบบจำลองบ้านพักอาศัย ประกอบด้วยวงจรหลัก Fmain และวงจรย่อย 4 วงจร ได้แก่ วงจรแสงสว่างชั้นล่าง (F1) วงจรแสงสว่างชั้นบน (F2) วงจรเต้ารับ (F3) และวงจรเครื่องทำน้ำอุ่น (F4) ระบบติดตั้งเซ็นเซอร์ 5 จุดเพื่อวัดค่าพารามิเตอร์ไฟฟ้าและเปรียบเทียบค่าที่วัดได้กับมัลติมิเตอร์มาตรฐาน ผลการทดลองพบว่า การสื่อสารข้อมูลระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์กับโนดเรด มีความถูกต้องอยู่ในช่วง 97-100 เปอร์เซ็นต์ และระบบสามารถควบคุมการเปิด-ปิดโหลดผ่านแดชบอร์ดได้ ผลการประเมินเซ็นเซอร์พบว่า ค่าความคลาดเคลื่อนของกระแสไฟฟ้าอยู่ในช่วง 0.00-33.33 เปอร์เซ็นต์ และกำลังไฟฟ้าอยู่ในช่วง 0.01-47.10 เปอร์เซ็นต์ โดยพบความคลาดเคลื่อนสูงในโหลดขนาดเล็กและเครื่องทำน้ำอุ่น ขณะที่โหลดขนาดกลางมีความคลาดเคลื่อนของกำลังไฟฟ้า 1.33 เปอร์เซ็นต์ ระบบสามารถแสดงค่าพลังงานไฟฟ้า ค่าไฟฟ้า และคาร์บอนฟุตพริ้นท์แบบต่อเนื่องได้ อย่างไรก็ตาม ควรมีการปรับเทียบเซ็นเซอร์และทดสอบซ้ำในสภาวะใช้งานจริงก่อนนำไปประยุกต์ใช้

8. เอกสารอ้างอิง

- การุณย์ ชัยวนิชย์ และพุทธิ อุลลซุข. (2561). การเพิ่มประสิทธิภาพพลังงานของการปรับเปลี่ยนอุปกรณ์ไฟฟ้าแสงสว่างเพื่อลดการปล่อย ก๊าซเรือนกระจก กรณีศึกษาส่วนการศึกษา โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า. วารสารวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 2(4), 1-13.
<https://ph03.tci-thaijo.org/index.php/ajsas/article/view/3553>
- การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค. (2561). ระบบประมาณการค่าไฟ. <https://eservice.pea.co.th/EstimateBill/index.html>
- จิรพันธ์ จันฤชัย, อริณย์ภักดิ์ พัทธพงษ์, ชุตติชัย ลิ้มศุภสิน, และปพิชญา บุรจิภาชัย. (2568). การประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์จากการปลดปล่อยก๊าซมีเทน และก๊าซไนตรัสออกไซด์ กรณีศึกษา ฟาร์มเลี้ยงไก่เนื้อในจังหวัดชลบุรี ประเทศไทย. วารสารวิทยาศาสตร์ วิศวกรรมศาสตร์ และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเลย, 5(2), 14-28. <https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/JSET/article/view/259042>



- ณรงค์ชัย ดีสม, บุตรดี มะลัยทอง, ปรัชญา ประยงค์หอม, จ्ञานงค์ พันสนธิ, และบุญเจตน์ แจ่มจันทร์. (2568). การพัฒนามอเตอร์ไฟฟ้าแบบ IoT (Internet of Things) 5 หน่วย. *วารสารเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.อีสาน*, 6(2), 86-96. <https://li01.tci-thaijo.org/index.php/atj/article/view/266039>
- ธิบดินทร์ แสงสว่าง, ธีรวัฒน์ วีระกเสนีย์, และศิริวัช พูลศิลป์. (2559). การวิเคราะห์คาร์บอนฟุตพริ้นท์จากโครงการก่อสร้างสะพานข้ามแยกคลองหลวง จ.ปทุมธานี ประเทศไทย. *วารสาร มทร.อีสาน ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*, 9(2), 131-144. <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/rmutjo/article/view/65773>
- นฤมล พันธุ์ทวีทรัพย์, อารีฟ เจ๊ะเซ็ง, เมธิยา หมวดนิม, และอัฟสะเฮห์ เจ๊ะโซ๊ะ. (2568). การประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของสำนักงานองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นกรณีศึกษาองค์การบริหารส่วนตำบลบันนังสตา อำเภอบันนังสตา จังหวัดยะลา. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มรย.*, 10(3), 55-64. <https://li01.tci-thaijo.org/index.php/yrjst/article/view/267541>
- บรรจง แจ่มศรี, อเนก ทอนสูงเนิน, มนต์รี สุขเศรษฐ์, และทวี ไชยโคตร. (2567). เครื่องวัดค่าไฟฟ้าผ่านเครือข่ายระบบอินเทอร์เน็ต. *วารสารวิชาการสถาบันการอาชีวศึกษาภาคใต้ 2*, 4(1), 127-135. <https://so11.tci-thaijo.org/index.php/AndamamJournal/article/view/2984>
- ภาณุมาศ ทรัพย์ประกอบ และวรวิทย์ พันธรักษ์. (2567). การพัฒนาระบบควบคุมปลั๊กไฟและแสดงผลผ่านสมาร์ทโฟน ด้วยเทคโนโลยีไอโอที. *วารสารการจัดการเทคโนโลยีและนวัตกรรมดิจิทัล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ*, 1(2), 1-11. <https://ph05.tci-thaijo.org/index.php/TMDI/article/view/157>
- มนนภา เทพสุด และชนิษฐา ชัยรัตนาวรรณ. (2567). ภาวะโลกร้อน: ภัยคุกคามร้ายแรงที่ถูกขับเคลื่อนบนโลกยุคอุตสาหกรรม. *วารสารสมาคมนักวิจัย*, 29(2), 96-113. <https://so04.tci-thaijo.org/index.php/jar/article/view/271892>
- รุ่งนภา จิรวัฒน์สมพร และบุษราคัม จิตตานวัฒน์. (2568). การประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของโรงงานผลิตวัคซีนแห่งหนึ่งในจังหวัดสระบุรี. *วารสารสาธารณสุข มหาวิทยาลัยบูรพา*, 20(1), 104-119. <https://he02.tci-thaijo.org/index.php/phjbuu/article/view/273744>
- Bonavolontà, F., Liccardo, A., Mottola, F., & Proto, D. (2025). Real-time monitoring of energy contributions in renewable energy communities through an IoT measurement system. *Sensors*, 25(5). 1402. <https://doi.org/10.3390/s25051402>
- Chaiyong, W. & Sonasang, S. (2022). Applications of energy monitoring using the IoT. *SNRU Journal of Science and Technology*, 14(2), 245041. <https://doi.org/10.55674/snrujst.v14i2.245041>
- Chen, C.-Y., Wu, S.-H., Huang, B.-W., Huang, C.-H., & Yang, C.-F. (2024). Web-based internet of things on environmental and lighting control and monitoring system using Node-RED, MQTT and modbus communications within embedded linux platform. *Internet of Things*, 27, 101305. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2024.101305>

- Khasawneh, H. J., Al Asbahi, R., Alzarqi, A. W., Al Qada, D. R., Bujuk, A., Nawfal, M. A., & Tareen, M. (2025). Industrial IoT-based submetering solution for real-time energy monitoring. *Discover Internet of Things*, 5, 15 (2025). <https://doi.org/10.1007/s43926-025-00110-y>
- O'Leary, N. & Conway-Jones, D. (2026). *Low-code programming for event-driven applications: Node-RED*. <https://github.com/node-red/node-red>
- Omid, S. A., Baig, M. J., & Iqbal, M. T. (2023). Design and implementation of Node-Red based open-source SCADA architecture for a hybrid power system. *Energies*, 16(5), 2092. <https://doi.org/10.3390/en16052092>
- Sharan, M., Das, P., Gupta, H., Angalaeswari, S., Deepa, T., Balamurugan, P., & Subbulekshmi, D. (2023). Peak Load Management System Using Node-Red Software Considering Peak Load Analysis. *Integrated Green Energy Solutions Volume 1*, 217-228. <https://doi.org/10.1002/9781119847564.ch15>
- Wongwut, K., & Angamnuaysiri, D. (2024). The development of real-time energy monitoring system using IoT base. *Journal of Applied Research on Science and Technology*, 23(3), 1-11. <https://doi.org/10.60101/jarst.2024.255911>
- Zidni, H., Putra, K. T., Santosa, F. G., Nugroho, A., Pranoto, S., Rahaman, M., & Chu, H.-T. (2024). Developing a scalable IoT-based platform for enhancing air quality monitoring in public transport using Node-RED. *Journal of Electrical Technology UMY*, 8(2), 60-66. <https://doi.org/10.18196/jet.v8i2.24701>