การออกแบบและหาประสิทธิภาพเครื่องวัดปริมาณไฟฟ้าแบบเวลาจริง

Design and Performance Measurement of Real-Time Electricity Meter

ธีรวัฒน์ ติ๊บอ้าย[1*], ชัยอดุลย์ เรียนสอน[1], ชัชวาลย์ แสงแก้ว[1], มนตรี ธีรตระกูล[1], ไชยรัตน์ สุวรรณอำไพ[1],
ธราธิป ภู่ระหงษ์[2], และ ธาดาพงศ์ พรมจันทร์[3]
Theerawat Tibeye[1*], Chaiadul Reanson[1], Chatchawarn Sangkaew[1], Montree Teeratrakul[1],
Chairat Suwanampai[1], Tharathip Phurahong[2], and Thadapong Pormjan[3]

Received: 20 January 2026
Revised: 21 May 2026
Accepted: 4 June 2026

Abstract

This research aimed to design a real-time electrical measurement device, evaluate its performance, and assess its usability. The error analysis of the real-time device compared with a kilowatt-hour meter showed mean errors of 1.05 percent for total electrical energy, 0.37 percent for voltage, and 1.38 percent for current. Regarding user satisfaction with the device, its usability achieved a good level, while its overall physical design was rated at a moderate level.

Keywords: Real-time electricity meter

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและสร้างเครื่องวัดปริมาณไฟฟ้าแบบเวลาจริงเพื่อหาประสิทธิภาพของเครื่องวัดปริมาณไฟฟ้าแบบเวลาจริง และเพื่อหาความเหมาะสมด้านการใช้งานของเครื่องวัดปริมาณไฟฟ้าแบบเวลาจริง ผลการวิเคราะห์พบว่า ค่าความคลาดเคลื่อนของกำลังไฟฟ้าเทียบกับกิโลวัตต์ฮาวร์มิเตอร์ เฉลี่ย 1.05 เปอร์เซ็นต์ ค่าความคลาดเคลื่อนของแรงดันเฉลี่ย 0.37 เปอร์เซ็นต์ และค่าความคลาดเคลื่อนของกระแสเฉลี่ย 1.38 เปอร์เซ็นต์ ผลการประเมินความเหมาะสมของเครื่องวัดปริมาณไฟฟ้าแบบเวลาจริงพบว่าด้านลักษณะการใช้งาน มีความเหมาะสมในระดับดี และด้านลักษณะทางกายภาพมีความเหมาะสมในระดับปานกลาง

คำสำคัญ : เครื่องวัดปริมาณไฟฟ้าแบบเวลาจริง

[1]วิทยาลัยเทคนิคน่าน สถาบันการอาชีวศึกษาภาคเหนือ 2 จ.น่าน
[1]Nan Technical College, Institute of Vocational Education Northern Region 2, Nan Province, 55000, Thailand
[2]คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยนครพนม จ.นครพนม 48000
[2]Faculty of Industrial Technology, Nakhon Phanom University, Nakhon Phanom Province, 48000, Thailand
[3]บริษัท พลัส พร็อพเพอร์ตี้ จำกัด, เขตวัฒนา กรุงเทพมหานคร 10110
[3]Plus Property Company Limited, Bangkok, 10110, Thailand
*Corresponding Author, E-mail: Theerawat110916@gmail.com

บทนำ

ปัจจุบันพลังงานไฟฟ้าเป็นปัจจัยสำคัญในการดำเนินชีวิตและการทำงานในทุกภาคส่วน ไม่ว่าจะเป็นภาคครัวเรือน อุตสาหกรรม หรือธุรกิจ การใช้พลังงานไฟฟ้าอย่างมีประสิทธิภาพจึงเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อลดต้นทุนและเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน ดังนั้น เครื่องตรวจวัดค่าพลังงานไฟฟ้าแบบเวลาจริง จึงถูกพัฒนาขึ้นเพื่อช่วยให้ผู้ใช้สามารถตรวจสอบและวิเคราะห์ปริมาณการใช้พลังงานได้อย่างแม่นยำและทันทีเครื่องมือนี้สามารถวัดค่าทางไฟฟ้าต่างๆ เช่น แรงดัน กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า พลังงานที่ใช้ ความถี่ไฟฟ้า และตัวประกอบกำลังไฟฟ้า โดยค่าที่วัดได้จะแสดงผลบนหน้าจอแบบเวลาจริง ทำให้ผู้ใช้สามารถนำข้อมูลไปใช้ในการวางแผนและปรับปรุงการใช้พลังงานให้เกิดประโยชน์สูงสุดด้วยฟังก์ชันการทำงานที่ครบถ้วนและความสามารถในการตรวจวัดแบบเวลาจริง เครื่องตรวจวัดค่าพลังงานไฟฟ้านี้จึงเหมาะสำหรับผู้ที่ต้องการเฝ้าติดตามและบริหารจัดการพลังงานไฟฟ้าอย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งในภาคครัวเรือนและภาคอุตสาหกรรม เพื่อส่งเสริมการใช้พลังงานอย่างคุ้มค่าและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ปัจจุบันการใช้พลังงานไฟฟ้าในภาคครัวเรือน อุตสาหกรรม และธุรกิจมักไม่มีระบบติดตามการใช้พลังงานแบบเวลาจริง ส่งผลให้เกิดปัญหาต่างๆ ตรวจวัดค่าพลังงานไฟฟ้าแบบเวลาจริง สามารถวัดค่าแรงดัน กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า พลังงานที่ใช้ ความถี่ และตัวประกอบกำลัง พร้อมแสดงผลทันทีบนหน้าจอ และช่วยให้ผู้ใช้วิเคราะห์การใช้พลังงานผู้ใช้สามารถระบุอุปกรณ์ที่ใช้พลังงานสูงเพื่อนำไปปรับปรุงการใช้ไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น ลดค่าไฟฟ้าและเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานด้วยข้อมูลที่แม่นยำ ผู้ใช้สามารถปรับพฤติกรรมการใช้ไฟฟ้า เช่น ปิดอุปกรณ์ที่ไม่จำเป็น หรือเลือกใช้อุปกรณ์ที่ประหยัดพลังงานช่วยในการวางแผนและบริหารจัดการพลังงานข้อมูลที่ได้สามารถใช้สำหรับวางแผนการลดต้นทุนพลังงานในระยะยาว ทั้งในครัวเรือนและภาคอุตสาหกรรม ด้วยคุณสมบัติเหล่านี้ เครื่องตรวจวัดค่าพลังงานไฟฟ้าแบบเวลาจริงจึงเป็นเครื่องมือที่ช่วยแก้ปัญหาการใช้พลังงานอย่างไม่มีประสิทธิภาพ ลดค่าใช้จ่าย และเพิ่มความปลอดภัยในการใช้งานไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ

วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อออกแบบเครื่องวัดปริมาณไฟฟ้าแบบเวลาจริง โดยประยุกต์ใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง

2. เพื่อประเมินประสิทธิภาพด้านความแม่นยำและความเสถียรในการตรวจวัดค่าทางไฟฟ้าของเครื่องวัดปริมาณไฟฟ้าแบบเวลาจริง

3. เพื่อศึกษาความเหมาะสมต่อการนำไปใช้งานจริงในอาคารหรือสถานประกอบการของเครื่องวัดปริมาณไฟฟ้าแบบเวลาจริง

ทบทวนวรรณกรรม

เครื่องวัดปริมาณไฟฟ้าแบบเวลาจริง (Real-time electrical device)

เป็นเครื่องมือวัดที่ใช้ ตรวจวัดและแสดงค่าทางไฟฟ้าได้ทันทีขณะใช้งานจริง ไม่ต้องรออ่านค่าย้อนหลัง ช่วยให้เห็นพฤติกรรมการใช้ปริมาณไฟฟ้าขณะนั้นและตัดสินใจปรับการใช้พลังงานไฟฟ้าได้รวดเร็ว โดยสามารถวัดปริมาณไฟฟ้า ได้แก่ แรงดันไฟฟ้า (Voltage) กระแสไฟฟ้า (Current) กำลังไฟฟ้า (Power) พลังงานไฟฟ้า (Energy) ความถี่ไฟฟ้า (Frequency) และตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (Power factor) (Hz) ซึ่งค่าที่วัดได้จะถูกประมวลผลและแสดงผลอย่างต่อเนื่องในช่วงเวลาสั้น ๆ ระดับวินาทีหรือใกล้เคียงเวลาจริง ทำให้ผู้ใช้สามารถรับรู้สถานะการใช้พลังงานไฟฟ้าได้ทันที (Gonen, 2015; Capehart et al., 2020) การตรวจวัดพลังงานไฟฟ้าแบบเวลาจริงแตกต่างจากเครื่องวัดพลังงานไฟฟ้าแบบดั้งเดิมที่แสดงผลในลักษณะค่าพลังงานสะสมเท่านั้น โดยเครื่องวัดแบบเวลาจริงสามารถแสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าทางไฟฟ้าได้ตลอดเวลาซึ่งช่วยให้ผู้ใช้สามารถวิเคราะห์พฤติกรรมการใช้พลังงานไฟฟ้า เช่น ช่วงเวลาที่มีการใช้พลังงานสูง อุปกรณ์ที่ใช้พลังงานมากผิดปกติ หรือการเปลี่ยนแปลงของโหลดไฟฟ้าในระบบได้อย่างแม่นยำ (Capehart et al., 2020) นอกจากนี้ เครื่องวัดปริมาณไฟฟ้าแบบเวลาจริง ยังมีบทบาทสำคัญต่อการบริหารจัดการพลังงาน (Energy management) โดยข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดสามารถนำไปใช้ในการตัดสินใจเพื่อลดการใช้พลังงานที่ไม่จำเป็น เพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน และลดต้นทุนค่าไฟฟ้าในระยะยาว ทั้งในระดับครัวเรือน อาคารสำนักงาน และภาคอุตสาหกรรม (Gonen, 2015) ในด้านความปลอดภัยและความเสถียรของระบบไฟฟ้า การตรวจวัดพลังงานไฟฟ้าแบบเวลาจริงช่วยให้สามารถตรวจพบความผิดปกติของระบบไฟฟ้าได้อย่างรวดเร็ว เช่น สภาวะโหลดเกิน (Overload) การเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้า ความถี่ไฟฟ้าที่ไม่อยู่ในช่วงมาตรฐาน หรือค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าที่ต่ำกว่ามาตรฐาน ซึ่งความผิดปกติเหล่านี้อาจส่งผลให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ไฟฟ้า ลดอายุการใช้งานของเครื่องจักร และเพิ่มความเสี่ยงต่อการเกิดอุบัติเหตุทางไฟฟ้า ตามมาตรฐานคุณภาพไฟฟ้าของสถาบันวิศวกรไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ เครื่องวัดที่สามารถตรวจวัดและแสดงผลข้อมูลทางไฟฟ้าแบบเวลาจริง ถือเป็นเครื่องมือสำคัญในการเฝ้าระวังคุณภาพไฟฟ้า (Power quality monitoring) เนื่องจากช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถรับรู้และแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าได้ก่อนที่จะส่งผลกระทบรุนแรงต่อระบบโดยรวม (IEEE, 2010) กล่าวโดยสรุป เครื่องวัดปริมาณไฟฟ้าแบบเวลาจริงจึงเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการตรวจสอบ วิเคราะห์ และบริหารจัดการพลังงานไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าสมัยใหม่ โดยสนับสนุนการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ ปลอดภัย และยั่งยืน

เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (Internet of Things: IoT)

เป็นแนวคิดและเทคโนโลยีที่มุ่งเน้นการเชื่อม ต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ วัตถุ หรือสิ่งต่าง ๆ เข้ากับเครือข่ายอินเทอร์เน็ต เพื่อให้สามารถรับรู้สภาพ แวดล้อม แลกเปลี่ยนข้อมูล และสั่งการควบคุมการทำงานได้โดยอัตโนมัติหรือจากระยะไกล อุปกรณ์เหล่านี้มักประกอบด้วยเซ็นเซอร์ ตัวประมวลผล และ

โมดูลสื่อสาร ซึ่งทำให้ระบบสามารถทำงานร่วมกันเป็นเครือข่ายอัจฉริยะได้ (Atzori et al., 2010) โครงสร้างพื้นฐานของระบบ IoT โดยทั่วไปประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก ได้แก่ 1) ส่วนรับรู้ข้อมูล (Perception Layer) ทำหน้าที่ตรวจวัดข้อมูลจากสภาพแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ความชื้น หรือค่าทางไฟฟ้า 2) ส่วนเครือข่าย (Network layer) ทำหน้าที่รับส่งข้อมูลผ่านเครือข่ายสื่อสาร เช่น Wi-Fi, Ethernet หรือเครือข่ายไร้สายอื่น ๆ 3) ส่วนแอปพลิเคชัน (Application layer) ทำหน้าที่ประมวลผล วิเคราะห์ และแสดงผลข้อมูลให้ผู้ใช้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ (Gubbi et al., 2013) ปัจจุบันเทคโนโลยี IoT ถูกนำไปประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายในหลายด้าน เช่น ระบบสมาร์ตโฮม ระบบสมาร์ตบิวดิง ระบบอุตสาหกรรมอัจฉริยะ และระบบจัดการพลังงาน โดยเฉพาะในด้านการตรวจวัดและควบคุมการใช้พลังงานไฟฟ้า ซึ่ง IoT ช่วยให้สามารถติดตามการใช้พลังงานได้แบบเวลาจริง และสามารถควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Depuru et al., 2011) การประยุกต์ใช้ IoT ในระบบตรวจวัดพลังงานไฟฟ้าช่วยให้ข้อมูลที่ได้จากเซ็นเซอร์ตรวจวัด เช่น แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้า สามารถถูกส่งไปจัดเก็บบนระบบคลาวด์แบบเวลาจริง ข้อมูลดังกล่าวสามารถนำไปวิเคราะห์แนวโน้มการใช้พลังงาน ตรวจจับความผิดปกติของระบบไฟฟ้า และสนับสนุนการตัดสินใจด้านการบริหารจัดการพลังงานได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำยิ่งขึ้น (Al-Fuqaha et al., 2015) นอกจากนี้ IoT ยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการจัดการพลังงานในอาคารและองค์กร เนื่องจากสามารถรวบรวมข้อมูลการใช้พลังงานจากหลายจุดพร้อมกัน และนำข้อมูลเหล่านั้นมาวิเคราะห์เพื่อปรับปรุงการใช้พลังงาน ลดการสูญเสีย และลดต้นทุนด้านพลังงานในระยะยาวซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดของระบบสมาร์ตกริดและการพัฒนาพลังงานอย่างยั่งยืน (Gubbi et al., 2013) กล่าวโดยสรุป เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งเป็นโครงสร้างพื้นฐานสำคัญที่ช่วยสนับสนุนการพัฒนาระบบตรวจวัดพลังงานไฟฟ้าแบบเวลาจริง โดยช่วยให้การรวบรวม วิเคราะห์ และแสดงผลข้อมูลพลังงานไฟฟ้ามีความสะดวก รวดเร็ว และแม่นยำ ส่งผลให้การจัดการพลังงานมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

ไมโครคอนโทรลเลอร์ NodeMCU ESP8266 สำหรับระบบตรวจวัดพลังงานไฟฟ้า

เป็นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ที่พัฒนาขึ้นบนพื้นฐานของชิป ESP8266 ซึ่งเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์แบบ SoC (System-on-Chip) ที่รวมความสามารถด้านการประมวลผลและการสื่อสาร Wi-Fi 2.4 GHz ไว้ในตัว ทำให้เหมาะสมกับงาน IoT ที่ต้องการเชื่อมต่อเครือข่ายและส่งข้อมูลแบบเวลาจริง จุดเด่นของ ESP8266 คือมีวงจรแปลง USB-to-Serial ทำให้สามารถโปรแกรมผ่าน USB ได้สะดวก มีขา GPIO ที่พร้อมใช้งานสำหรับเชื่อมต่อเซ็นเซอร์หรือโมดูลภายนอก เหมาะต่อการพัฒนาโครงงานต้นแบบและงานทดลองด้าน IoT (Schwartz, 2016) คุณสมบัติสำคัญของ ESP8266 ที่เกี่ยวข้องกับระบบตรวจวัดพลังงานสำหรับงานตรวจวัดพลังงานไฟฟ้าแบบเวลาจริง คือการอ่านค่าจากเซ็นเซอร์ หรือโมดูลวัดพลังงานแล้วทำการประมวลผลข้อมูล และส่งข้อมูลขึ้นระบบออนไลน์ มีดังนี้ 1) Wi-Fi 802.11 b/g/n (2.4 GHz) พร้อมสแตก TCP/IP ในตัวช่วยให้อุปกรณ์ส่งข้อมูลไปยังเซิร์ฟเวอร์/คลาวด์ได้โดยตรง 2) CPU 32-

bit Tensilica L106 ทำงานทั่วไปที่ความถี่ 80 MHz. และสามารถปรับสูงขึ้นได้ในบางโหมด (ขึ้นกับซอฟต์แวร์/การตั้งค่า) เหมาะกับการเก็บข้อมูลเป็นช่วงเวลาและประมวลผลเบื้องต้นก่อนส่งขึ้นระบบ PBV et al. (2024) 3) GPIO และบัสสื่อสารมาตรฐาน เช่น UART, SPI, I2C (ทำผ่านซอฟต์แวร์ได้) ทำให้เชื่อมต่อกับโมดูลวัดพลังงานอย่าง PZEM-004T หรือโมดูลอื่น ๆ ได้สะดวก 4) รองรับโหมดประหยัดพลังงาน เช่น Modem-sleep/Light-sleep/Deep-sleep ช่วยลดการใช้พลังงานในงานที่ต้องการทำงานด้วยแบตเตอรี่หรือทำงานเป็นช่วง ๆ (Udeze, 2025) โดย ESP8266 ในระบบตรวจวัดพลังงานไฟฟ้าจะทำหน้าที่ตามลำดับดังนี้ 1) รับข้อมูลจากเซ็นเซอร์/โมดูลวัดพลังงาน คือ PZEM-004T ส่งค่าพารามิเตอร์ไฟฟ้าออกมาผ่าน UART ทำให้ ESP8266 อ่านค่าทีละช่วงเวลา (ทุก 1 วินาที) 2) ประมวลผลและจัดรูปแบบข้อมูลคือ คำนวณค่าเฉลี่ยรายนาที/ชั่วโมง, จัดข้อมูลเป็น JSON หรือ CSV และ 3) สื่อสารและส่งข้อมูลขึ้นระบบออนไลน์ ESP8266 สามารถส่งข้อมูลผ่าน Wi-Fi ด้วยโปรโตคอล เช่น HTTP, MQTT, WebSocket หรือส่งไปยังฐานข้อมูล/แดชบอร์ดบนคลาวด์ ซึ่งมีไลบรารีรองรับพร้อมใช้งาน

อุปกรณ์ตรวจวัดปริมาณไฟฟ้า PZEM-004T

โมดูลตรวจวัดปริมาณไฟฟ้ากระแสสลับ (AC Digital power energy meter module) ถูกออกแบบมาเพื่อใช้ในการวัดและประมวลผลค่าทางไฟฟ้าได้แก่ แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า พลังงานไฟฟ้า ความถี่ไฟฟ้า และตัวประกอบกำลังไฟฟ้า โมดูลสามารถทำงานร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์ผ่านการสื่อสารแบบอนุกรม (UART) PZEM-004T ทำงานรับสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับโดยตรงจากระบบไฟฟ้า และตรวจวัดกระแสไฟฟ้าผ่านหม้อแปลงกระแส (Current Transformer: CT) ซึ่งช่วยแยกวงจรไฟฟ้ากำลังออกจากวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ทำให้การวัดมีความปลอดภัยมากขึ้น ข้อมูลแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ตรวจวัดได้จะถูกนำไปประมวลผลภายในโมดูลเพื่อคำนวณค่ากำลังไฟฟ้า พลังงานไฟฟ้า และตัวประกอบกำลังไฟฟ้า ก่อนส่งข้อมูลออกมาในรูปแบบดิจิทัลผ่าน UART ธีรพงศ์ สงผัดและคณะ (2568) โมดูล PZEM-004T สามารถตรวจวัดค่าทางไฟฟ้าได้หลายพารามิเตอร์ ซึ่งมีความสำคัญต่อการวิเคราะห์การใช้พลังงานไฟฟ้า ได้แก่ แรงดันไฟฟ้าใช้ในการตรวจสอบความเสถียรของระบบไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าใช้ระบุปริมาณโหลดที่เชื่อมต่อในระบบ กำลังไฟฟ้าแสดงปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ใช้งานจริง พลังงานไฟฟ้าแสดงปริมาณพลังงานที่ใช้สะสมในหน่วยกิโลวัตต์–ชั่วโมง (kWh) ความถี่ไฟฟ้าใช้ตรวจสอบคุณภาพของระบบไฟฟ้ากระแสสลับ ตัวประกอบกำลังไฟฟ้าใช้ประเมินประสิทธิภาพการใช้พลังงานของโหลดไฟฟ้า ซึ่งค่าพารามิเตอร์เหล่านี้เป็นข้อมูลพื้นฐานที่จำเป็นสำหรับการบริหารจัดการพลังงาน การตรวจสอบคุณภาพไฟฟ้าในอาคารหรือสถานประกอบการ (Gonen, 2015; IEEE, 2010) PZEM-004T รองรับการสื่อสารข้อมูลผ่าน UART ทำให้สามารถเชื่อมต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP8266 ได้โดยตรงและจะทำหน้าที่อ่านข้อมูลที่ได้ นำไปประมวลผลและส่งข้อมูลไปยังระบบจัดเก็บหรือแสดงผลบนแพลตฟอร์มออนไลน์ เช่น เว็บแดชบอร์ดหรือระบบคลาวด์ ซึ่งเป็นหัวใจสำคัญของระบบตรวจวัดพลังงานไฟฟ้าแบบเวลาจริง (Kolban, 2018)

การแสดงผลและการจัดเก็บข้อมูลพลังงานไฟฟ้าผ่านระบบคลาวด์ Google Sheets

เป็นระบบที่ช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถเข้าถึงข้อมูลได้ทุกที่ทุกเวลา สามารถวิเคราะห์แนวโน้มการใช้พลังงานไฟฟ้าได้อย่างชัดเจน (Capehart et al., 2020) โดย Google Sheets (Cloud-based spreadsheet) เป็นสเปรดชีตบนคลาวด์ที่รองรับการทำงานและอัปเดตข้อมูลแบบเวลาจริง อีกทั้งยังมีความสะดวกในการจัดรูปแบบข้อมูล การคำนวณพื้นฐาน และการแชร์ให้ผู้เกี่ยวข้องเข้าดู/ร่วมทำงานได้ (Sukhdeve, 2023; Nguyen, 2023) โดยสามารถจัดเก็บเป็นตาราง, เวลา, ตำแหน่งค่าที่วัดได้เหมาะกับ Time-Series แบบง่าย, แชร์และร่วมกันตรวจสอบข้อมูลได้สะดวก และเชื่อมต่อกับเครื่องมือทำแดชบอร์ดได้ง่าย เช่น Looker Studio ซึ่งการรับ–ส่งข้อมูลจากอุปกรณ์ IoT ไปยังคลาวด์ Google Apps Script ในการพัฒนาระบบจะมีตัวกลางรับข้อมูลจากไมโครคอนโทรลเลอร์แล้วเขียนลง Google Sheets ได้แก่ Google Apps Script ทำเป็น Web App/Web API เพื่อรับคำขอแบบ HTTP (GET/POST) และบันทึกข้อมูลลงชีตได้โดยอัตโนมัติ (Peters, 2023) ส่วนการแสดงผลข้อมูลปริมาณไฟฟ้าผ่านแดชบอร์ดออนไลน์ (Online Dashboard) คือการนำข้อมูลจำนวนมากมาแสดงในรูปแบบที่อ่านง่าย เช่น กราฟเส้นแนวโน้ม กราฟแท่งเปรียบเทียบ KPI (kWh/วัน, kW สูงสุด, PF เฉลี่ย) เพื่อให้ผู้ใช้งานเห็นภาพรวมและตัดสินใจได้เร็วขึ้น ซึ่งเป็นหัวใจของงานจัดการพลังงานไฟฟ้า (Capehart et al., 2020) โดย Looker Studio เป็นเครื่องมือทำรายงานและแดชบอร์ดบนเว็บที่สามารถเชื่อมต่อแหล่งข้อมูลหลายประเภท รวมถึง Google Sheets และนำข้อมูลมาสร้างกราฟ/ตัวชี้วัดได้แบบโต้ตอบและแชร์ให้ผู้เกี่ยวข้องเข้าดูได้ง่าย (Sukhdeve, 2023) การจัดเก็บข้อมูลพลังงานไฟฟ้าบนคลาวด์ Google Sheets ร่วมกับการแสดงผลผ่านแดชบอร์ด Looker Studio ทำให้ระบบตรวจวัดพลังงานไฟฟ้าแบบเวลาจริงโดยผู้ใช้งานสามารถเข้าถึงข้อมูล วิเคราะห์แนวโน้มและตัดสินใจด้านการจัดการพลังงานไฟฟ้าได้อย่างรวดเร็วและเป็นระบบ สอดคล้องกับหลักการด้านการจัดการพลังงานไฟฟ้า (Capehart et al., 2020; Levine, 2016)

ณรงค์ชัย ดีสม และคณะ (2568) ได้ศึกษาการพัฒนามิเตอร์ไฟฟ้าแบบ IoT จำนวน 5 หน่วย โดยใช้โมดูลวัดพลังงานไฟฟ้า PZEM-004T ผลการวิจัยพบว่าระบบสามารถวัดค่าทางไฟฟ้า ได้แก่ แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า ความถี่ ตัวประกอบกำลังไฟฟ้า และพลังงานไฟฟ้าได้อย่างแม่นยำ โดยค่าความคลาดเคลื่อนของแรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้าอยู่ในช่วง ±0.16%, ±0.91% และ ±0.80% ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคกำหนด นอกจากนี้ระบบสามารถส่งข้อมูลไปยังคลาวด์และแสดงผลผ่านแดชบอร์ดแบบเวลาจริง ผู้ใช้สามารถดูข้อมูลย้อนหลังผ่านเว็บเบราว์เซอร์ นำข้อมูลไปใช้วิเคราะห์และบริหารจัดการพลังงานไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ เช่นเดียวกัน ธีรพงศ์ สงผัดและคณะ (2568) ได้ศึกษาการพัฒนาระบบตรวจวัดการใช้พลังงานไฟฟ้าโดยประยุกต์ใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง และพบว่าระบบสามารถตรวจวัดและบันทึกข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่องแบบเวลาจริง และสามารถแสดงแนวโน้มการใช้พลังงานของอาคารผ่านแดชบอร์ดที่ใช้งานง่าย ช่วยสนับสนุนการวางแผนและการตัดสินใจในการลดการใช้พลังงานอย่างเป็นระบบ

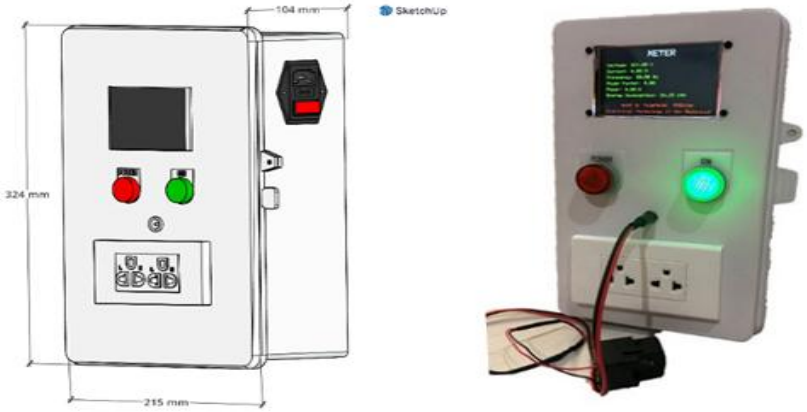
นอกจากนี้การประเมินโดยผู้เชี่ยวชาญพบว่าระบบมีประสิทธิภาพโดยรวมอยู่ในระดับมากที่สุด สะท้อนถึงความถูกต้อง ความเสถียร และความเหมาะสมในการนำไปใช้งานจริงในอาคารเรียนหรือสำนักงาน และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการจัดการพลังงานขององค์กรเพื่อลดต้นทุนในระยะยาวได้ และผลวิจัยของประสาน ภัทรประสงค์ และคณะ (2563) ที่สร้างและหาประสิทธิภาพมิเตอร์อัจฉริยะวัดค่าพลังงานไฟฟ้าทั้งภาคครัวเรือนและอุตสาหกรรมแบบเวลาจริง พบว่าประสิทธิภาพมิเตอร์อัจฉริยะ สามารถวัดค่าได้ใกล้เคียงกับมิเตอร์ที่ได้มาตรฐานของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคที่ใช้ในปัจจุบันโดยมีค่าผิดพลาดเฉลี่ย 0.816% และการประเมินความพึงพอใจในการสร้างมิเตอร์อัจฉริยะของผู้เชี่ยวชาญพบว่า การออกแบบอุปกรณ์ ประสิทธิภาพในการทำงาน และความพึงพอใจภาพรวมของการใช้งาน อยู่ในระดับปานกลาง เช่นเดียวกัน สุรัติ พัฒนา และคณะ (2564) ได้พัฒนาซอฟต์แวร์ระบบตรวจวัดกำลังไฟฟ้าแบบเวลาจริงบนพื้นฐานแนวคิดสมาร์ทมิเตอร์ พบว่าระบบสามารถตรวจวัดพลังงานไฟฟ้าส่งข้อมูลผ่านเครือข่าย และจัดเก็บข้อมูลในฐานข้อมูลได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยใช้ฮาร์ดแวร์ที่มีต้นทุนต่ำ สามารถทดแทนการเปลี่ยนวัตต์มิเตอร์รุ่นเก่าให้เป็นสมาร์ทมิเตอร์ได้ช่วยลดค่าใช้จ่ายในการปรับปรุงระบบ อีกทั้งข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดยังสามารถนำไปใช้ในการวางแผนการใช้พลังงานไฟฟ้าในครัวเรือน และสนับสนุนการบำรุงรักษาอุปกรณ์เพื่อลดความเสี่ยงการหยุดทำงานในระบบจ่ายไฟฟ้า

วิธีดำเนินการวิจัย

การดำเนินการออกแบบและพัฒนาเครื่องวัดปริมาณไฟฟ้าแบบเวลาจริง มีขั้นตอนดังนี้

1. การออกแบบเครื่องวัดค่าทางไฟฟ้าแบบเวลาจริง

หลักในการออกแบบอุปกรณ์ด้าน IoT นี้มุ่งให้มีความสามารถในการทำงานด้านการรับ-ส่งข้อมูลด้วยระบบการสื่อสารแบบไร้สายเป็นอุปกรณ์หลัก และใช้อุปกรณ์สำหรับวัดค่าพลังงานที่มีความสามารถในการรับ-ส่ง ข้อมูลพื้นฐานแบบดิจิตอลมาเป็นอุปกรณ์เซ็นเซอร์ในการวัดค่าพลังงาน และบันทึกในระบบฐานข้อมูล ซึ่งอุปกรณ์ดังกล่าว หาซื้อง่าย มีราคาถูก เป็นที่นิยมของนักพัฒนาซอฟต์แวร์ ดังแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 โครงสร้างและส่วนประกอบของเครื่องวัดปริมาณไฟฟ้าแบบเวลาจริง

2. **การหาประสิทธิภาพของเครื่องวัดปริมาณไฟฟ้าแบบเวลาจริง**

2.1 ทำการวัดโหลดเครื่องใช้ไฟฟ้าภายในห้องพักที่ประกอบด้วยเครื่องปรับอากาศและเครื่องทำความเย็น จากนั้นนำ CT ของเครื่องวัดปริมาณไฟฟ้าแบบเวลาจริง ตรวจวัดค่าที่ตู้ Consumer Units นำค่าพลังงานไฟฟ้าที่วัดได้มาเปรียบเทียบกับกิโลวัตต์ฮาวร์มิเตอร์ของห้องพัก

2.2 ทำการวัดที่ให้เครื่องจ่ายโหลดเป็นเครื่องเป่าลมร้อน Stanley ขนาด 2000 วัตต์ โดยวัดที่สายไฟเข้าเครื่อง จากนั้นนำค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่เครื่องวัดปริมาณไฟฟ้าแบบเวลาจริงวัดได้ มาเปรียบเทียบกับแคลมป์ออนมิเตอร์แล้ววัดความแม่นยำของการวัดค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้า

การเก็บรวบรวมข้อมูลและการวิเคราะห์ข้อมูล

1. ประเมินประสิทธิภาพ ดำเนินการทดสอบโดยการวัดโหลดที่ตู้ Consumer Units แล้ววัดความแม่นยำของวัดค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของเครื่องที่วัดได้พร้อมบันทึกผล

2. ประเมินความเหมาะสมการใช้งานของเครื่องวัดค่าทางไฟฟ้าแบบเวลาจริงโดยประเมินลักษณะการใช้งาน และลักษณะทางกายภาพ

นำข้อมูลที่ได้คำนวณค่าทางสถิติ ได้แก่ ค่าเฉลี่ย และ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ผลการวิจัย

การวิจัยออกแบบและพัฒนาเครื่องวัดปริมาณไฟฟ้าแบบเวลาจริง ปรากฏผลดังนี้

1. เครื่องวัดค่าทางไฟฟ้าแบบเวลาจริง

ตัวเครื่องสามารถวัดค่าแรงดัน กระแส ความถี่ ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ กำลังไฟฟ้า และค่าพลังงานที่ใช้เฉลี่ย ออกแบบโดยใช้กล่องพักสายขนาด สูง 300 มม. x กว้าง 200 มม. x ลึก 104 มม. อุปกรณ์ประกอบด้วย จอแสดงผลขนาด 4.0 inch SPI serial screen backplane module with at least 4 IO drivers โมดูลแปลงไฟ AC-DC HLK-10M05 Power Supply Module AC-DC 220 VAC to 5VDC NodeMCU ESP8266 V2 CH9102 LUA Wifi based ESP8266-12E, โมดูลวัดค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้า PZEM-004T AC Digital Power Energy Meter Module V3.0 100A ดังแสดงในภาพที่ 2

ภาพที่ 2 ลักษณะภายนอกและภายในเครื่องวัดค่าทางไฟฟ้าแบบเวลาจริง

อุปกรณ์ด้าน IoT นี้สามารถทำงานในด้านการรับ-ส่ง ข้อมูลด้วยระบบการสื่อสารแบบไร้สายเป็นอุปกรณ์หลัก และใช้อุปกรณ์สำหรับวัดค่าพลังงานที่มีความสามารถในการรับ-ส่ง ข้อมูลพื้นฐานแบบดิจิตอลมาเป็นอุปกรณ์เซ็นเซอร์ในการวัดค่าพลังงาน จากนั้นส่งค่าที่วัดได้ให้กับอุปกรณ์หลัก และบันทึกในระบบฐานข้อมูล

2. ประสิทธิภาพของเครื่องวัดปริมาณไฟฟ้าแบบเวลาจริง

2.1 ประสิทธิภาพของเครื่องวัดปริมาณไฟฟ้าแบบเวลาจริง โดยการวัดโหลดเครื่องใช้ไฟฟ้าภายในห้องพักที่ประกอบด้วยเครื่องปรับอากาศ และเครื่องทำความเย็น พบว่า การทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องวัดปริมาณไฟฟ้าแบบเวลาจริง จ่ายโหลดที่ 12 ชั่วโมง มีค่าหน่วยกำลังไฟฟ้ารวมเฉลี่ย 1.89 kWh เมื่อวัดเทียบกับกิโลวัตต์ฮาวร์มิเตอร์ค่าหน่วยกำลังไฟฟ้ารวมเฉลี่ย 1.91 kWh ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 1.047% แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องวัดปริมาณไฟฟ้าแบบเวลาจริง โดยการวัดโหลดเครื่องปรับอากาศ และเครื่องทำความเย็น

ชั่วโมงที่	เวลา	วัดด้วยเครื่องวัดปริมาณไฟฟ้าแบบเวลาจริง	วัดด้วยกิโลวัตต์ฮาวร์มิเตอร์	ค่าความคลาดเคลื่อน (%)
		หน่วยปริมาณไฟฟ้ารวม (kWh)	หน่วยปริมาณไฟฟ้ารวม (kWh)	
1	07:00	0.26	0.00	0.58
2	08:00	1.57	1.57	0.0
3	09:00	3.07	3.07	0.0
4	10:00	4.28	4.27	0.71
5	11:00	5.60	5.57	1.08
6	12:00	6.29	6.27	1.45
7	13:00	6.68	6.67	0.30
8	14:00	7.66	7.67	0.13
9	15:00	8.89	8.87	1.02
10	16:00	10.15	10.17	0.50
11	17:00	11.52	11.57	0.17
12	18:00	12.94	12.97	0.32
รวมเฉลี่ย		1.89	1.91	1.05

2.2 ประสิทธิภาพของเครื่องวัดปริมาณไฟฟ้าแบบเวลาจริง โดยการวัดโหลดเป็นเครื่องเป่าลมร้อน Stanley ขนาด 2000 วัตต์ พบว่า ค่าแรงดันไฟฟ้าที่เครื่องวัดปริมาณไฟฟ้าแบบเวลาจริงวัดได้เฉลี่ย 229.67 โวลต์ ค่ากระแสวัดได้เฉลี่ย 6.06 แอมป์ เทียบกับการวัดด้วยแคลมป์ออนมิเตอร์ ค่าแรงดันที่วัดได้เฉลี่ย

230.52 โวลต์ ค่ากระแสที่วัดได้เฉลี่ย 6.14 แอมป์ มีค่าความคลาดเคลื่อนของการวัดแรงดันเฉลี่ย 0.369 เปอร์เซ็นต์และค่าความคลาดเคลื่อนของการวัดกระแสเฉลี่ย 1.380% แสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องวัดปริมาณไฟฟ้าแบบเวลาจริง โดยการวัดโหลดเครื่องเป่าลมร้อน Stanley ขนาด 2000 วัตต์

ช่วงเวลา (นาที)	วัดด้วยเครื่องวัดปริมาณไฟฟ้าแบบเวลาจริง		วัดด้วยแคลมป์ออนมิเตอร์ (ตรวจวัด)		ค่าความคลาดเคลื่อน (%)	
	แรงดัน (V)	กระแส (A)	แรงดัน (V)	กระแส (A)	แรงดัน (V)	กระแส (A)
5	229.00	6.30	230.30	6.50	0.56	3.07
10	230.00	6.00	230.80	6.22	0.35	3.54
15	231.00	6.10	231.00	6.15	0.00	0.81
20	230.00	6.10	230.80	6.12	0.35	0.33
25	228.00	6.00	229.30	5.99	0.57	0.17
30	230.00	6.00	230.50	6.06	0.22	0.99
35	232.00	5.70	232.00	6.01	0.00	0.17
40	230.00	6.20	231.20	5.83	0.52	2.23
45	229.00	6.20	230.00	6.34	0.44	2.21
50	228.00	6.20	229.90	6.32	0.83	1.90
55	230.00	6.00	230.60	6.08	0.26	1.32
60	229.00	6.10	229.80	6.11	0.35	0.16
รวมเฉลี่ย	229.67	6.06	230.52	6.14	0.37	1.38

3. **ความเหมาะสมด้านการใช้งานของเครื่องวัดปริมาณไฟฟ้าแบบเวลาจริง**

3.1 ลักษณะการใช้งาน

ผู้ประเมินมีความคิดเห็นต่อเครื่องวัดปริมาณไฟฟ้าแบบเวลาจริง ด้านลักษณะการใช้งาน โดยภาพรวมเห็นว่ามีความเหมาะสมในระดับดี ($\bar{x}$= 3.52) ประเมินรายข้อพบว่ามีความคิดเห็นในระดับดี เรียงตามลำดับค่าเฉลี่ยได้แก่ ความเร็วในการแสดงผลข้อมูลแบบเวลาจริง ($\bar{x}$= 3.80) ระบบความปลอดภัยของเครื่องและง่ายต่อการบำรุงรักษา ($\bar{x}$= 3.60) ความคิดเห็นระดับปานกลาง ได้แก่ ความแม่นยำในการวัดค่าทางไฟฟ้า ($\bar{x}$= 3.40) และ มีความสะดวกในการใช้งาน ($\bar{x}$= 3.20) แสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ลักษณะการใช้งานของเครื่องวัดปริมาณไฟฟ้าแบบเวลาจริง

ลำดับ	รายการประเมิน	$\bar{x}$	S.D.	ระดับเหมาะสม
1	ระบบความปลอดภัยของเครื่อง	3.60	0.89	ดี
2	ความสะดวกในการใช้งาน	3.20	0.45	ปานกลาง
3	ความแม่นยำในการวัดค่าทางไฟฟ้า	3.40	0.89	ปานกลาง
4	ความเร็วในการแสดงผลข้อมูลแบบเวลาจริง	3.80	0.84	ดี
5	ง่ายต่อการบำรุงรักษา	3.60	0.89	ดี
	ผลรวมเฉลี่ย	3.52	0.23	ดี

3.2 การประเมินลักษณะทางกายภาพ

ผู้ประเมินมีความคิดเห็นต่อเครื่องวัดปริมาณไฟฟ้าแบบเวลาจริง ด้านลักษณะทางกายภาพ โดยภาพรวมเห็นว่ามีความเหมาะสมในระดับปานกลาง ($\bar{x}$=3.18) และมีความคิดเห็นในระดับดี เรียงตามลำดับค่าเฉลี่ยได้แก่ ระบบสามารถปรับปรุงข้อมูลผ่านเครือข่ายคอมพิวเตอร์ได้ ($\bar{x}$=4.00) และขนาดของเครื่องมีความเหมาะสม ($\bar{x}$=3.80) ความคิดเห็นระดับปานกลาง เรียงตามลำดับค่าเฉลี่ยได้แก่ ความสามารถในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของข้อมูล ($\bar{x}$=3.40) หน้าจอแสดงผล แสดงข้อมูลครบถ้วน ชัดเจนหรือไม่ ($\bar{x}$=3.20) และ วัสดุที่ใช้ แข็งแรง ทนทาน ($\bar{x}$=3.00) แสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของเครื่องวัดปริมาณไฟฟ้าแบบเวลาจริง

ลำดับ	รายการประเมิน	$\bar{x}$	S.D.	ระดับเหมาะสม
1	ขนาดของเครื่องมีความเหมาะสม	3.80	0.84	ดี
2	ความสามารถในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของข้อมูล	3.40	0.89	ปานกลาง
3	ระบบสามารถปรับปรุงข้อมูลผ่านเครือข่ายคอมพิวเตอร์ได้	4.00	1.00	ดี
4	วัสดุที่ใช้แข็งแรง ทนทาน	3.00	0.01	ปานกลาง
5	หน้าจอแสดงผล แสดงข้อมูลครบถ้วน ชัดเจน	3.20	1.10	ปานกลาง
	ผลรวมเฉลี่ย	3.18	0.37	ปานกลาง

อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

ผลการออกแบบและสร้างเครื่องวัดปริมาณไฟฟ้าแบบเวลาจริง สามารถวัดค่าแรงดัน กระแส ความถี่ ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ กำลังไฟฟ้า และค่าพลังงานที่ใช้เฉลี่ย ออกแบบโดยใช้ตู้กันน้ำขนาดกว้าง

209.5 มม. x ยาว 318 มม. x ลึก 151 มม. ภายในประกอบด้วย จอแสดงผลขนาด 4.0 inch SPI serial screen backplane module with at least 4 IO drivers โมดูลแปลงไฟ AC-DC HLK-10M05 Power supply module AC-DC 220 VAC to 5VDC NodeMCU ESP8266 V2 CH9102 LUA Wifi based ESP8266-12E โมดูลวัดค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้า PZEM-004T AC Digital power energy meter module V3.0 100A ผลวิเคราะห์ประสิทธิภาพของเครื่องวัดปริมาณไฟฟ้าแบบเวลาจริง ด้านความคลาดเคลื่อนของการวัดค่ากำลังไฟฟ้าเปรียบเทียบด้วยการเทียบกับกิโลวัตต์ฮาวร์มิเตอร์ พบว่า ค่าความคลาดเคลื่อนของหน่วยพลังงานไฟฟ้ารวมเฉลี่ย 1.047 เปอร์เซ็นต์ ด้านความแม่นยำในการวัดค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้า พบว่า ความคลาดเคลื่อนของค่ากำลังไฟฟ้าเปรียบเทียบค่ากระแสและแรงดันด้วยมัลติมิเตอร์ มีค่าความคลาดเคลื่อนของกระแสเฉลี่ย 1.380 เปอร์เซ็นต์ ค่าความคลาดเคลื่อนของแรงดันเฉลี่ย 0.369 เปอร์เซ็นต์ และ สอดคล้องกับประสาน ภัทรประสงค์ และคณะ (2563) ที่รายงานผลการสร้างและหาประสิทธิภาพมิเตอร์อัจฉริยะวัดค่าพลังงานไฟฟ้าทั้งภาคครัวเรือนและอุตสาหกรรม แบบเวลาจริง ผลจากทดสอบสามารถวัดค่าได้ใกล้เคียงกับมิเตอร์ที่ได้มาตรฐานของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคที่ใช้ในปัจจุบัน มีค่าผิดพลาดเพียง 0.816 เปอร์เซ็นต์ ความเหมาะสมของเครื่องวัดปริมาณไฟฟ้าแบบเวลาจริงในลักษณะการใช้งานมีความเหมาะสมระดับดี และลักษณะทางกายภาพมีความเหมาะสมระดับปานกลาง

References

ณรงค์ ชัยดีสม, บุตรดี มะลัยทอง, ปรัชญา ประยงค์หอม, จำนงค์ พันสนิท, และ บุญเจตน์ แจ่มจันทร์. (2568). การพัฒนามิเตอร์ไฟฟ้าแบบ IoT (Internet of Things) 5 หน่วย. *วารสารเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.อีสาน, 6*(2), 86-96.

ธีรพงศ์ สงผัด, สุวิชชาบูรณ์ บญุช่วย, และ จิรวัฒน์ บุญวาส. (2568). การพัฒนาระบบตรวจวัดการใช้พลังงานไฟฟ้าโดยใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง. *Journal of Computer and Creative Technology*, *3*(2), 230-243.

ประสาน ภัทรประสงค์, สุทธิพันธ์ สุวรรณรัตน์, และ สมยศ สุวรรณรัตน์. (2563). การสร้างและหาประสิทธิภาพมิเตอร์อัจฉริยะวัดค่าพลังงานไฟฟ้าทั้งภาคครัวเรือนและอุตสาหกรรมแบบ Real Time. *วารสารวิชาการสถาบันการอาชีวศึกษาภาคใต้ 1, 5*(1), 82-92.

สุรัติ พัฒนา และ ยอดธง เม่นสิน. (2564). *การพัฒนาซอฟต์แวร์ระบบ ตรวจวัดกำลังไฟฟ้าแบบเรียล ไทม์บนพื้นฐานแนวคิดสมาร์ทมิเตอร์*. [ปริญญานิพนธ์ดุษฎีบัณฑิต ไม่ได้ตีพิมพ์]. มหาวิทยาลัยนเรศวร.

Al-Fuqaha, A., Guizani, M., Mohammadi, M., Aledhari, M., & Ayyash, M. (2015). Internet of things: A survey on enabling technologies, protocols, and applications. *IEEE communications surveys & tutorials*, *17*(4), 2347-2376.

Atzori, L., Iera, A., & Morabito, G. (2010). The internet of things: A survey. *Computer networks*, *54*(15), 2787-2805.

Capehart, B. L., Turner, W. C., & Kennedy, W. J. (2020). *Guide to energy management*, (8th ed.). Fairmont Press.

Depuru, S. S. S. R., Wang, L., Devabhaktuni, V., & Gudi, N. (2011, March). Smart meters for power grid-Challenges, issues, advantages and status. In *2011 IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition* (pp. 1-7). IEEE.

Gonen, T. (2015). *Electric power distribution engineering*, (3rd ed.). CRC Press.

Gubbi, J., Buyya, R., Marusic, S., & Palaniswami, M. (2013). Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. *Future generation computer systems*, *29*(7), 1645-1660.

IEEE. (2010). *IEEE standard for electric power quality* (IEEE Std 1159-2009). Institute of Electrical and Electronics Engineers.

Kolban, M., & Szwed, A. (2018). Application of the SPineCOR dynamic corrective brace in treating idiopathic scoliosis. *Chir. Narzadow Ruchu Ortop. Pol*, *83*(1), 1-4.

Levine, J. S., Fukai, I., Soeder, D. J., Bromhal, G., Dilmore, R. M., Guthrie, G. D., ... & Goodman, A. L. (2016). US DOE NETL methodology for estimating the prospective CO2 storage resource of shales at the national and regional scale. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, *51*, 81-94.

Nguyen, P. (2023). Google Workspace for Education: A study and case usage of Google apps in the classroom. *敬和学園大学研究紀要*, *32*, 105-119.

PBV, R. R., Mandapati, V. S., Pilli, S. L., Manojna, P. L., Chandana, T. H., & Hemalatha, V. (2024, April). Home security with iot and esp32 cam-ai thinker module. In *2024 International Conference on Cognitive Robotics and Intelligent Systems (ICC-ROBINS)* (pp. 710-714). IEEE.

Peters, C. (2023). Apple and google App stores v. developers. *Wash. U. Global Stud. L. Rev.*, *22*, 87.

Schwartz, M. (2016). *Internet of Things with ESP8266: Build amazing Internet of Things projects using the ESP8266 Wi-Fi chip*. Packt Publishing Ltd.

Sukhdeve, D. S., & Sukhdeve, S. S. (2023). Google Cloud Platform for Data Science. *Apress: Berkeley, CA, USA*.

Udeze, J. C. (2025, September). Internet of things enabled smart environmental monitoring system based on the espressif system 32 microcontroller. In *conference proceedings of association of science eductors anambra* (pp. 95-106).