เครื่องวัดกำลังไฟฟ้าอัจฉริยะสำหรับการติดตามสมรรถนะแผงผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

A SMART POWER METER FOR PHOTOVOLTAIC PERFORMANCE

จักรพงษ์ โนอ๊วบ, รัฐกาญน์ แก้วเบี่ยง, นภาพร ตุ้มทองคำ, นฤมล วันน้อย
วรชัย ศรีเมือง, ชัยสิทธิ์ วันน้อย*

Jakkapong No-Uab, Rattakan Keawbiang, Napaporn Toomthongkum
Narumon Wannoi, Worachai Srimuang, Chaisit Wannoi*

คณะเทคโนโลยีการเกษตรและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ อ.เมือง จ.เพชรบูรณ์ ประเทศไทย 67000
Faculty of Agricultural and Industrial Technology, Phetchabun Rajabhat University,
Muang, Phetchabun, Thailand, 67000
*Corresponding author e-mail: chaisit.w@pcru.ac.th

วันที่เข้าระบบ 10 กุมภาพันธ์ 2566
วันที่แก้ไขบทความ 30 เมษายน 2566
วันที่ตอบรับบทความ 7 พฤษภาคม 2566

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้นำเสนอเครื่องวัดกำลังไฟฟ้าอัจฉริยะสำหรับการติดตามสมรรถนะแผงผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (PV) โดยใช้เทคโนโลยีอินเตอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (IoT) ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบให้ทำงานบนแอปพลิเคชันบลิงค์ในการแสดงผลบนสมาร์ทโฟนแบบเรียลไทม์ นอกจากนี้ยังสามารถแจ้งเตือนผู้ดูแลระบบผ่านแอพพลิเคชันไลน์ ในกรณีที่แรงดันไฟฟ้าของแผงต่ำกว่าค่าควบคุมหรือกระแสไฟฟ้าของแผงสูงถึงขีดจำกัดของแผง โดยการติดตามสมรรถนะของแผงผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์จะประกอบไปด้วย ค่าแรงดันไฟฟ้า (V) ค่ากระแสไฟฟ้า (A) ค่ากำลังไฟฟ้า (W) ค่ากำลังไฟฟ้าสะสม (Wh) และเปอร์เซ็นต์การผลิตไฟฟ้าของแผง (%) โดยผลการประเมินประสิทธิภาพของเครื่องพบว่าค่าความผิดพลาดของการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 0.45% และค่าความผิดพลาดของกระแสไฟฟ้าโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 1.19% สำหรับผลการศึกษาการทำงานของเครื่องซึ่งได้ทำการติดตั้งร่วมกับระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์พบว่าสามารถติดตามสมรรถนะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์นั้นได้ นอกจากนี้ข้อมูลกำลังไฟฟ้าสะสมสามารถใช้เป็นข้อมูลในการพยากรณ์กำลังผลิตเพื่อวางแผนรองรับการเปลี่ยนแปลงของปริมาณโหลด อีกทั้งยังสามารถช่วยให้ผู้ดูแลวางแผนในการเข้าตรวจและซ่อมบำรุงได้ถูกจุด รวดเร็วขึ้น พร้อมช่วยลดความเสี่ยงการเกิดอุบัติเหตุได้

คำสำคัญ: เครื่องวัดกำลังไฟฟ้า, การติดตามสมรรถนะแผงผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์, อินเตอร์เน็ตของสรรพสิ่ง, ระบบเรียลไทม์

Abstract

This article presents a smart power meter for monitoring photovoltaic performance using internet of things technology (IoT). This research was designed to work on the Blynk application for real time monitoring on mobile phones. In addition, administrators could be alerted via LINE application in the event when the panel voltage was lower than the control value or the panel's current was higher than the panel's limit. The performance monitoring of PV panel included voltage (V), current (A), power (W), power consumption (Wh), and the PV panel's electricity generation percentage (%). The efficiency assessment results of the device showed that the average voltage measurement error was 0.45% and the average current error was 1.19%. The operation study results of the device installed with the photovoltaic power generation system indicated that the performance could be tracked. In addition, the cumulative power data could be used as power forecasting data to plan for changes in load. It could also help caregivers plan for inspections and maintenance at the right spot faster while reducing the risk of accidents.

Keywords: Power meter, Photovoltaic performance monitoring, Internet of thing, Real-time system

1. บทนำ

ในปัจจุบันพลังงานไฟฟ้าเป็นปัจจัยและเป็นสิ่งสำคัญต่อการดำเนินชีวิตของมนุษย์ ทั้งภาคอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ ภาคการเกษตร หรือแม้กระทั่งภาคครัวเรือนขนาดเล็กๆ การใช้พลังงานที่นำมาผลิตไฟฟ้าในประเทศไทยในปัจจุบันโดยส่วนใหญ่นั้นจะเป็นพลังงานประเภทแบบสิ้นเปลือง อย่างเช่นก๊าซธรรมชาติ น้ำมันเตา และถ่านหิน ในขณะที่ประเทศนั้นมีแหล่งผลิตก๊าซธรรมชาติ น้ำมันเตา และถ่านหินที่จำกัด ต้องอาศัยการนำเข้าเชื้อเพลิงจากต่างประเทศเพื่อให้เพียงพอในการผลิตไฟฟ้ากับปริมาณความต้องการในประเทศ ซึ่งภาครัฐต้องสูญเสียงบประมาณในการนำเข้าเชื้อเพลิงเหล่านี้ค่อนข้างมาก ดังนั้นแนวทางหนึ่งที่จะช่วยลดการใช้พลังงานสิ้นเปลืองเหล่านี้คือการใช้พลังงานทดแทน หากพิจารณาตามแผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย พ.ศ. 2561 – 2580 จะพบว่าภาครัฐนั้นให้ความสำคัญและให้การสนับสนุนในการใช้พลังงานทดแทนในการผลิตไฟฟ้ามากขึ้น และที่สำคัญสภาพภูมิศาสตร์และตำแหน่งที่ตั้งของประเทศไทย ระบบการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์นั้นเป็นพลังงานทดแทนที่มีความเหมาะสมเป็นอย่างมาก โดยพลังงานแสงอาทิตย์สามารถเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยการใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic) ซึ่ง

เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า โดยระบบการผลิตไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์นี้สิ่งที่สำคัญในขบวนการผลิตก็คือประสิทธิการทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งจำเป็นต้องมีตรวจสอบอยู่เป็นประจำ นอกเหนือจากการตรวจสอบสภาพภายนอกหรือสภาพทางกายภาพทั่วไปแล้ว ผู้ดูแลจำเป็นอย่างยิ่งต้องทำการตรวจสอบสมรรถนะของแผงว่ายังคงทำงานดีอยู่หรือไม่ และประสิทธิภาพการทำงานของแผงลดลงหรือไม่ ซึ่งแนวทางการพัฒนาระบบตรวจสอบและการปรับปรุงประสิทธิภาพเช่น Benjamin *et al.*, (2022) ได้ทำการศึกษาการตรวจสอบสิ่งสกปรกของแผงโซลาร์เซลล์และการทำความสะอาดเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพ และยังมีการศึกษาของ Opeyeolu & Moyahabo (2021) ได้นำเสนอการปรับปรุงประสิทธิภาพแผงโซลาร์เซลล์แบบโพลีคริสตัลไลน์โดยใช้ระบบระบายความร้อนด้วยน้ำเพื่อควบคุมความร้อน โดยทั่วไปในการตรวจสอบสมรรถนะของแผงก็จะทำการตรวจวัดระดับแรงดันไฟฟ้า ปริมาณกระแส ความเข้มแสง และอุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งการตรวจสอบค่าเหล่านี้ก็จะใช้คนในการตรวจสอบเป็นหลัก ถ้าเป็นระบบผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก เช่น การผลิตไฟฟ้าเพื่อใช้งานเอง โดยเฉพาะระบบผลิตไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนหลังคา (Solar roof) สำหรับรูปแบบการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคานั้นได้มี Yuvaraja *et al.* (2017) ได้นำเสนอการออกแบบการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนหลังคาพร้อมด้วยระบบตรวจสอบและติดตาม นอกจากนี้ยังมี Aparupa *et al.* (2018) ได้นำเสนอการออกแบบโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาสำหรับ JSSATEN ซึ่งการตรวจสอบสมรรถนะแผงของระบบผลิตไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนหลังคานั้นจะทำได้ลำบากเนื่องจากอยู่บนที่สูงและเป็นอันตรายอีกทั้งยังต้องใช้เวลาในการตรวจวัดนาน

ดังนั้นด้วยปัญหาดังกล่าวและประกอบกับเทคโนโลยีด้านการสื่อสารที่มีการพัฒนาค่อนข้างมาก โดยเฉพาะระบบควบคุมติดตาม ผ่านระบบเครือข่ายอินเทอร์เน็ตบนสมาร์ทโฟน จึงได้มีแนวคิดเพื่อสร้างความสะดวกในการตรวจสอบและติดตามสมรรถนะของแผงผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ โดยได้ออกแบบสร้างต้นแบบเครื่องวัดกำลังไฟฟ้าอัจฉริยะสำหรับการติดตามสมรรถนะแผงผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้เทคโนโลยีไอโอที (IoT) โดยการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีไอโอทีนี้ได้มี Fatmah *et al.* (2022) ได้ทำการศึกษาเชื่อมต่อการจ่ายพลังงานแสงอาทิตย์บนแผงจ่ายไฟอัจฉริยะ (Smart distribution board) ด้วยระบบ IoT ซึ่งใช้ Arduino Mega2560 เป็นตัวประมวลผล และยังมี Monika & Nilesh (2019) ได้ทำการศึกษาระบบตรวจสอบเซลล์แสงอาทิตย์ระยะไกลอัจฉริยะที่ใช้ IOT โดยใช้ ESP32 ไมโครคอลโทรลเลอร์ในการประมวลผลซึ่งในการติดตามจะแสดงผลบน Blynk Webpage และยังมี Lavanya *et al.* (2019) ได้ทำการศึกษาระบบตรวจสอบแผงโซลาร์เซลล์โดยใช้เทคโนโลยีสมาร์ทโฟนโดยใช้ ATMega 2560 Arduino เป็นตัวประมวลผล และ Albert *et al.* (2020) ได้ทำการศึกษาระบบตรวจสอบแรงดัน กระแสไฟฟ้า พลังงาน และประสิทธิภาพของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ โดยส่งค่าไปยังสมาร์ทโฟน เว็บ และอีเมลแบบออนไลน์ตามเวลาจริง (Real

time) โดยใช้ Raspberry Pi 3 เป็นตัวประมวลผล รวมถึง Waheb *et al.* (2020) ได้ทำการศึกษาเครื่องวัดพลังงานอัจฉริยะที่ใช้เครือข่ายบริเวณกว้างระยะไกลสำหรับระบบไฟฟ้าโซลาร์เซลล์แบบสแตนด์อโลนโดยแสดงผลบนสมาร์ทโฟนโดยใช้โปรแกรม AllThingsTalk แต่เครื่องต้นแบบในงานวิจัยนี้ได้ใช้บอร์ด WeMos D1 mini ร่วมกับอุปกรณ์ตรวจจับแรงดันและกระแสไฟฟ้า PZEM 017 และสามารถแสดงผลค่าแรงดันไฟฟ้า ค่ากระแสไฟฟ้า ค่ากำลังไฟฟ้า ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าและสมรรถนะหรือความสามารถผลิตไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยการรายงานผลบนสมาร์ทโฟนนั้นได้ประยุกต์ใช้งานบนแอพพลิเคชันบลิงค์ และนอกจากนี้ยังสามารถแจ้งเตือนผ่านแอพพลิเคชันไลน์ (LINE Application) หากการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเกินค่าควบคุม ซึ่งการประยุกต์ใช้การแจ้งเตือนผ่านระบบไลน์นั้นได้มี Narumon & Chaisit (2022) ได้ประยุกต์การแจ้งเตือนผ่านทางแอพพลิเคชันไลน์ในการออกแบบระบบแจ้งเตือนภัยน้ำท่วม ซึ่งการแจ้งเตือนผ่านทางแอพพลิเคชันไลน์นั้นสามารถระบุเฉพาะเจาะจงกลุ่มที่ต้องการแจ้งเตือนภัยได้โดยตรงผ่านสมาร์ทโฟนของผู้ดูแลระบบได้โดยตรง นอกจากนี้เครื่องวัดกำลังไฟฟ้าอัจฉริยะนี้ยังสามารถช่วยลดภาระในการตรวจวัดกำลังไฟฟ้าของแผงผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ได้และยังสามารถลดความเสี่ยงในการเกิดอุบัติเหตุในการตรวจวัด กรณีที่ระบบติดตั้งแผงผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนหลังคาหรือที่สูงยากต่อการวัดค่า และที่สำคัญค่าที่แสดงผลบนแอพพลิเคชันบลิงค์ของงานวิจัยนี้จะแสดงผลแบบเรียลไทม์ซึ่งทำให้ผู้ดูแลสามารถติดตามการเปลี่ยนแปลงได้เสมือนจริงตามเวลาจริง โดยการแสดงผลแบบเรียลไทม์นี้ก็ได้มี Ghedhan *et al.* (2022) ได้ทำการศึกษาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการตรวจสอบระบบพลังงานไฟฟ้าโซลาร์เซลล์แบบเรียลไทม์โดยใช้อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งโดยใช้ ESP32 ไมโครคอลโทรลเลอร์เป็นตัวประมวลผล และยังมี Sheikh *et al.* (2021) ได้ทำการศึกษาระบบตรวจสอบพลังงานแสงอาทิตย์ระยะไกลแบบเรียลไทม์บนพื้นฐาน IOT โดยใช้ ESP8266 ไมโครคอลโทรลเลอร์เป็นตัวประมวลผล ซึ่งการแสดงผลแบบเรียลไทม์นี้เป็นประโยชน์ต่อการผลิตและติดตามสมรรถนะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เป็นอย่างมากซึ่งสามารถนำข้อมูลไปใช้ในการว างแผนบำรุงรักษาระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ อีกทั้งยังสามารถพยากรณ์กำลังไฟฟ้าสะสมล่วงหน้าเพื่อวางแผนการเปลี่ยนแปลงโหลดในอนาคตได้

2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

2.1 เพื่อสร้างต้นแบบเครื่องวัดกำลังไฟฟ้าอัจฉริยะสำหรับการติดตามสมรรถนะแผงผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรียลไทม์

2.2 เพื่อใช้ในการตรวจสอบ ติดตาม วางแผนการซ่อมบำรุงแผงผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์และลดความเสี่ยงการเกิดอุบัติเหตุจากการเข้าตรวจสอบ

2.3 เพื่อหาประสิทธิภาพของเครื่องวัดกำลังไฟฟ้าอัจฉริยะสำหรับการติดตามสมรรถนะแผงผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

3. วิธีดำเนินงานวิจัย

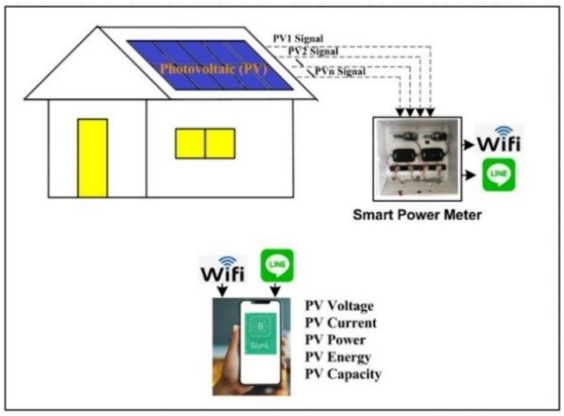
ในการศึกษาเครื่องวัดกำลังไฟฟ้าอัจฉริยะสำหรับติดตามสมรรถนะแผงผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์นั้นได้กำหนดวิธีดำเนินงานวิจัยได้ดังนี้

3.1 การออกแบบและกำหนดฟังก์ชันการทำงานเครื่องวัดกำลังไฟฟ้าอัจฉริยะ

ในการออกแบบระบบติดตามสมรรถนะแผงผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ของเครื่องวัดกำลังไฟฟ้าอัจฉริยะนี้ได้ออกแบบให้สามารถติดตาม ค่าแรงดันไฟฟ้า (V) ค่ากระแสไฟฟ้า (A) ค่ากำลังไฟฟ้า (W) ค่ากำลังไฟฟ้าสะสม (Wh) และเปอร์เซ็นต์การผลิตไฟฟ้าของแผง ซึ่งค่าต่างๆ ได้ออกแบบให้สามารถแสดงผลบนหน้าจอสมาร์ทโฟนทั้งในรูปแบบตัวเลขและกราฟเพื่อดูแนวโน้มการเปลี่ยนค่าแบบเรียลไทม์ (real time) ซึ่งในงานวิจัยได้ประยุกต์ใช้ร่วมกับแอพพลิเคชันบลิงค์ (Blynk application) ในการรับค่าและแสดงผลบนสมาร์ทโฟนซึ่งแอพพลิเคชันบลิงค์นั้นได้มี Weerathum & Somchat (2022) ได้ทำการประยุกต์ใช้แอพพลิเคชันบลิงค์ในการแสดงผลการตรวจสอบพลังงานโดยประยุกต์ใช้งานร่วมกับเทคโนโลยีไอโอที อีกทั้ง Muhammad & Mohd (2022) ได้มีการประยุกต์ใช้แอพพลิเคชันบลิงค์ในการพัฒนาเครื่องติดตามแสงอาทิตย์แบบแกนคู่พร้อมระบบตรวจสอบ IoT เป็นต้น ในงานวิจัยฉบับนี้ยังมีฟังก์ชันในการแจ้งเตือนหากแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าค่าที่กำหนดหรือกระแสไฟฟ้าสูงกว่าค่าที่กำหนดผ่านแอพพลิเคชันไลน์ (Line application) ในส่วนของค่าเปอร์เซ็นต์การผลิตไฟฟ้าของแผงนั้นจะพิจารณาจากกำลังผลิต ณ ขณะนั้นเทียบกับกำลังผลิตสูงสุดของแผงที่สามารถผลิตได้ โดยค่าเปอร์เซ็นต์การผลิตไฟฟ้าของแผงสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (1) และรูปแบบการทำงานโดยรวมของระบบสามารถแสดงได้ในภาพที่ 1

$$PG_{(\mathrm{PV})} = \frac{P_{(\mathrm{Real})} \times 100}{P_{(\mathrm{PV\ Max})}}\% \qquad (1)$$

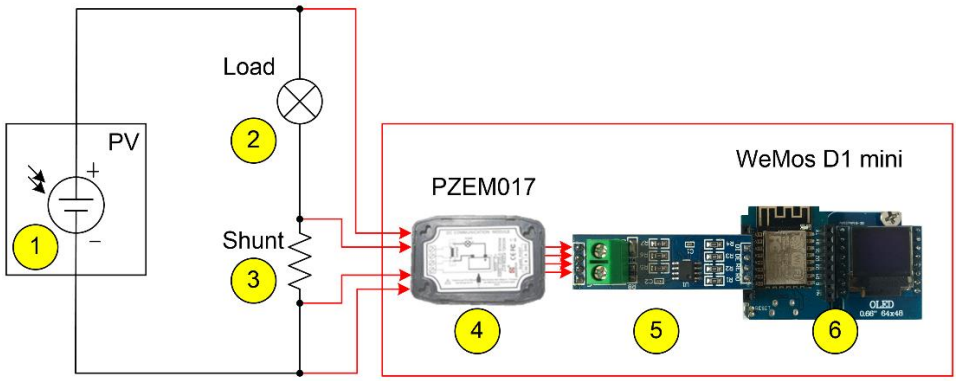
โดยที่ $PG_{(\mathrm{PV})}$ คือ เปอร์เซ็นต์การผลิตไฟฟ้าของแผง (%), $P_{(\mathrm{Real})}$ คือ กำลังไฟฟ้าจริงของแผงที่จ่าย ณ ขณะนั้น (W), $P_{(\mathrm{PV\ Max})}$ คือ กำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงที่จ่ายได้ (W)



ภาพที่ 1 รูปแบบการทำงานเครื่องวัดกำลังไฟฟ้าอัจฉริยะสำหรับการติดตามสมรรถนะแผงผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

3.2 การกำหนดวัสดุอุปกรณ์ในงานวิจัย

วัสดุอุปกรณ์หลักที่ใช้ในการออกแบบและสร้างเครื่องวัดกำลังไฟฟ้าอัจฉริยะของแผงผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์และลักษณะการต่อวงจรนั้นสามารถแสดงได้ในภาพที่ 2



ภาพที่ 2 อุปกรณ์หลักและการเชื่อมต่ออุปกรณ์เครื่องวัดกำลังไฟฟ้า

ซึ่งจากภาพที่ 2 กำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกจากแผงผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ หมายเลข 1 ไปยังโหลดหลอดไฟฟ้า หมายเลข 2 จะถูกต่ออนุกรมกับ Shunt (3) โดยจะมีเซ็นเซอร์ตรวจวัดกระแสและแรงดันไฟฟ้าหมายเลข 4 ซึ่งค่าที่วัดได้จะถูกแปลงสัญญาณด้วยชุดแปลงสัญญาณหมายเลข 5 และส่งสัญญาณไปยังชุดประมวลผลหมายเลข 6 เพื่อเชื่อมต่อ WIFI และส่งสัญญาณไปยังสมาร์ทโฟน

3.3 การทดสอบประสิทธิภาพเครื่องวัดกำลังไฟฟ้าอัจฉริยะ

ในการทดสอบประสิทธิภาพเครื่องจะพิจารณาจากค่าความผิดพลาดในการอ่านค่าข้อมูลและความแม่นยำในการส่งค่าแจ้งเตือน โดยการอ่านค่าแรงดันไฟฟ้าจะทำการสอบเทียบกับเครื่องวัดไฟฟ้ามัลติมิเตอร์ที่ได้มาตรฐาน รุ่น UNI-T UT33C+ สำหรับค่ากระแสจะทำการสอบเทียบกับเครื่องวัดมัลติมิเตอร์ LuZino รุ่น 7000728 โดยค่าความผิดพลาดสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2)

$$\%Error = \left| \frac{Value_{(\text{Pototype})} - Value_{(\text{Standard})}}{Value_{(\text{Standard})}} \right| \times 100\% \quad (2)$$

โดยที่ $\%Error$ คือ ค่าความผิดพลาด, $Value_{(\text{Pototype})}$ คือ ค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือวัดต้นแบบ, $Value_{(\text{Standard})}$ คือ ค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือวัดมาตรฐาน

สำหรับการทดสอบการแจ้งเตือนจะพิจารณาจากค่าแรงดันไฟฟ้าและค่ากระแสไฟฟ้าที่ตั้งไว้เทียบกับผลการแสดงข้อความการแจ้งเตือนผ่านแอพพลิเคชันไลน์ โดยค่าที่ใช้ในการทดสอบการแจ้งเตือนนั้นได้แสดงไว้ในตารางที่ 1 ซึ่งค่าควบคุมที่ตั้งไว้นี้ใช้ในการทดสอบเท่านั้นโดยในการนำไปใช้งานจริงสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามความเหมาะสมของข้อจำกัดของแผงและระบบการผลิตไฟฟ้า

ตารางที่ 1 ค่าควบคุมสำหรับการแจ้งเตือน

ชนิดค่าควบคุม	แรงดันไฟฟ้าต่ำ	กระแสไฟฟ้าเกินพิกัด
ค่าควบคุม	11 V	0.8 A

3.4 การพยากรณ์กำลังผลิตเพื่อวางแผนรองรับการเปลี่ยนแปลงโหลด

ในการพยากรณ์กำลังผลิตสะสมนั้นมีความสำคัญในการจัดการบริหารของระบบไฟฟ้ากำลังซึ่งได้มี Isha & Sunita (2019) ได้ทำการศึกษาการตรวจสอบแผงโซลาร์เซลล์และการทำนายพลังงานสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์อัจฉริยะ สำหรับการพยากรณ์กำลังผลิตสะสมในงานวิจัยฉบับนี้ได้ใช้วิธีการสร้างสมการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่ายภายใต้การวิเคราะห์อนุกรมเวลา โดยสมการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่ายนั้นสามารถแสดงได้ในสมการที่ (3) และจากสมการที่ (3) ค่าตัวแปร A และ B สามารถหาได้จากสมการที่ (4) และ (5)

$$Y_i = A + BX_i \quad (3)$$

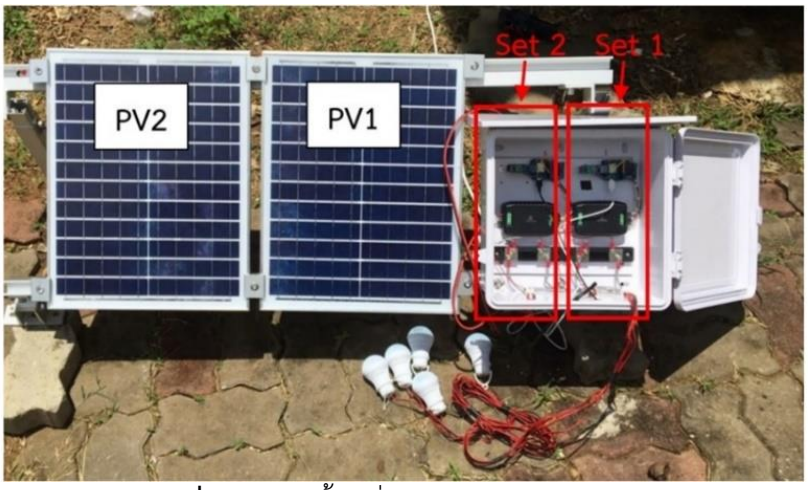
$$A = \overline{Y} - B\overline{X} \quad (4)$$

$$B = \frac{\sum XY - n\overline{X}.\overline{Y}}{\sum X^2 - n(\overline{X})^2} \quad (5)$$

โดยที่ Y_i คือ ตัวแปรตาม, X_i คือ ตัวแปรอิสระ, A คือ ค่าคงที่หรือจุดตัดบนแกน y, B คือ ค่าความชัน (slope), X คือ ชุดข้อมูลของ X , Y คือ ชุดข้อมูลของ Y , n คือ จำนวนของชุดข้อมูล, $\overline{X}$ คือ ค่าเฉลี่ยชุดข้อมูลของ X , $\overline{Y}$ คือ ค่าเฉลี่ยชุดข้อมูลของ Y

4. ผลการวิจัย

ผลการศึกษาวิจัยนั้นได้กำหนดการทดสอบในการทำงานของเครื่องโดยได้ออกแบบเครื่องวัดกำลังไฟฟ้าอัจฉริยะขึ้นมา 2 ชุดในการติดตามสมรรถนะแผงผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในแต่ละแผง ซึ่งขนาดของแผงนั้นมีขนาด 20 W และแรงดันแผงนั้นอยู่ที่ 12Vdc และกระแสสูงสุดอยู่ที่ 1.66 A โดยทั้งสองแผงต่อกันแบบขนานและจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดซึ่งในการทดสอบได้ใช้โหลดหลอดไฟฟ้าขนาด 3 W จำนวน 5 หลอดเพื่อศึกษาลักษณะการเปลี่ยนแปลงและผลการติดตามสมรรถนะของแผงผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์จากเครื่องวัดทั้ง 2 นี้ ดังแสดงในภาพที่ 3 โดยผลการทดสอบนั้นสามารถแบ่งหัวข้อออกเป็นดังนี้



ภาพที่ 3 การติดตั้งเครื่องวัดกำลังไฟฟ้ากับชุด PV

4.1 ผลการทดสอบประสิทธิภาพความเที่ยงตรงในการอ่านค่า

ในการทดสอบประสิทธิภาพความเที่ยงตรงในการอ่านค่านี้จะทำการสอบเทียบกับเครื่องวัดไฟฟ้ามัลติมิเตอร์ ซึ่งค่าที่จะทำการสอบเทียบประกอบด้วย ค่าความผิดพลาดในการอ่าน ค่าแรงดันไฟฟ้า (V) และค่ากระแสไฟฟ้า (I) โดยผลการศึกษาได้แสดงไว้ในตารางที่ 2 และในตารางที่ 3

ตารางที่ 2 ผลการศึกษาค่าความผิดพลาดการอ่านค่าเครื่องวัดกำลังไฟฟ้าชุดที่ 1 บนสมาร์ทโฟน

โหลด (W)	เครื่องวัดมัลติมิเตอร์		เครื่องต้นแบบ		%ค่าความผิดพลาด	
	แรงดัน (V)	กระแส (A)	แรงดัน (V)	กระแส (A)	แรงดัน (V)	กระแส (A)
3	9.71	0.06	9.63	0.06	0.82	0.00
6	9.25	0.06	9.19	0.06	0.65	0.00
9	11.57	0.16	11.61	0.16	0.35	0.00
12	11.65	0.54	11.55	0.56	0.86	3.70
15	11.96	0.89	11.93	0.91	0.25	2.25
ค่าเฉลี่ย ($\overline{X}$)					0.45	1.19
ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน ($S.D.$)					0.51	1.71

ตารางที่ 3 ผลการศึกษาค่าความผิดพลาดการอ่านค่าเครื่องวัดกำลังไฟฟ้าชุดที่ 2 บนสมาร์ทโฟน

โหลด (W)	เครื่องวัดมัลติมิเตอร์		เครื่องต้นแบบ		%ค่าความผิดพลาด	
	แรงดัน (V)	กระแส (A)	แรงดัน (V)	กระแส (A)	แรงดัน (V)	กระแส (A)
3	13.15	0.23	13.05	0.24	0.76	4.35
6	12.71	0.40	12.67	0.41	0.31	2.50
9	12.49	0.40	12.41	0.41	0.64	2.50
12	11.98	0.52	11.9	0.53	0.67	1.92
15	11.78	0.83	11.73	0.84	0.42	1.20
ค่าเฉลี่ย ($\overline{X}$)					0.56	2.50
ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน ($S.D.$)					0.19	1.17

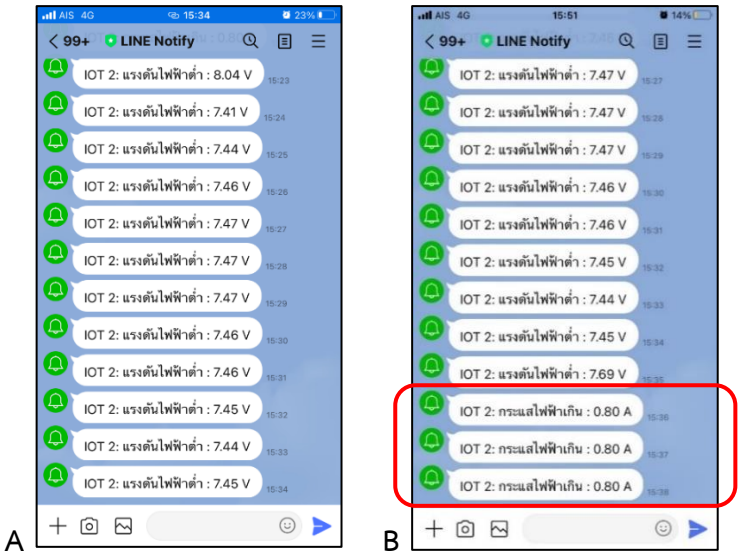
โดยค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของเครื่องนั้นสามารถหาได้จากสมการที่ (2) ในการทดสอบนั้นจะทำการอ่านค่าที่แสดงผลบนหน้าจอสมาร์ทโฟนซึ่งในการทดสอบนั้นได้ทำการทดสอบกับโหลด 5 ระดับที่แตกต่างกัน โดยผลการทดสอบประสิทธิภาพของชุดตรวจวัดกำลังไฟฟ้าสำหรับแผงที่ 1 นั้นได้แสดงไว้ในตารางที่ 2 ซึ่งพบว่าค่าความผิดพลาดเฉลี่ยในการอ่านค่าแรงดันไฟฟ้าอยู่ที่ 0.45 % ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ 0.51 และ ค่าความผิดพลาดโดยเฉลี่ยในการอ่านค่ากระแสไฟฟ้าอยู่ที่ 1.19 % ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ 1.71 และสำหรับผลการทดสอบประสิทธิภาพของชุด

ตรวจวัดกำลังไฟฟ้าสำหรับแผงที่ 2 นั้นได้แสดงไว้ในตารางที่ 3 โดยพบว่าค่าความผิดพลาดเฉลี่ยในการอ่านค่าแรงดันไฟฟ้าอยู่ที่ 0.56 % ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ 0.19 และค่าความผิดพลาดโดยเฉลี่ยในการอ่านค่ากระแสไฟฟ้าอยู่ที่ 2.50 % ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ 1.17

4.2 ผลการทดสอบการแจ้งเตือนผ่านแอพพลิเคชันไลน์ของเครื่องวัด

ผลการทดสอบการแจ้งเตือนของเครื่องวัดทั้งสองกับระบบในกรณีแผงผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละแผงนั้นมีแรงดันต่ำกว่าค่าที่กำหนดและกระแสไฟฟ้าสูงกว่าค่าที่กำหนดโดยค่าที่ใช้ควบคุมนั้นได้ดังแสดงไว้ในตารางที่ 1 โดยทำการทดสอบจำนวน 30 ครั้ง และผลการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของฟังก์ชันการแจ้งเตือนผ่านแอพพลิเคชันไลน์ พบว่าสามารถทำงานได้ทั้ง 30 ครั้ง ซึ่งประสิทธิภาพการทำงานในการแจ้งเตือนนั้นคิดเป็น 100 % โดยตัวอย่างข้อความการแจ้งเตือนผ่านแอพพลิเคชันไลน์ของเครื่องวัดทั้ง 2 ชุด สามารถแสดงได้ใน ภาพที่ 4 และภาพที่ 5

ภาพที่ 4 ข้อความการแจ้งเตือน (A) แรงดันไฟฟ้าต่ำ และ (B) กระแสไฟฟ้าสูง ของเครื่องวัดชุดที่ 1



ภาพที่ 5 ข้อความการแจ้งเตือน (A) แรงดันไฟฟ้าต่ำ และ (B) กระแสไฟฟ้าสูง ของเครื่องวัดชุดที่ 2

4.3 ผลการทดสอบการติดตามสมรรถนะแผงผลิตไฟฟ้าแสงอาทิตย์

การทดสอบการติดตามสมรรถนะแผงผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ จะทำการติดตั้งเครื่องวัดกำลังไฟฟ้าอัจฉริยะเข้ากับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และทำการบดบังแสงทีละ 25 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่แผงในขณะที่จ่ายโหลดคงที่ 15 W โดยผลการศึกษาได้แสดงไว้ในตารางที่ 4 และ 5

ตารางที่ 4 ผลการศึกษาการติดตามสมรรถนะของแผงผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ของชุดวัดที่ 1

เปอร์เซ็นต์พื้นที่แผงที่ถูกบดบัง	ข้อมูลการตรวจวัดสมรรถนะที่แสดงผลบนสมาร์ทโฟน			
	V	I	W	เปอร์เซ็นต์การผลิตไฟฟ้าของแผง PV1
0	11.94	0.91	10.80	54%
25	11.24	0.66	7.40	37%
50	11.55	0.59	6.80	34%
75	10.89	0.56	6	30%
100	9.63	0.06	0.50	2.50%

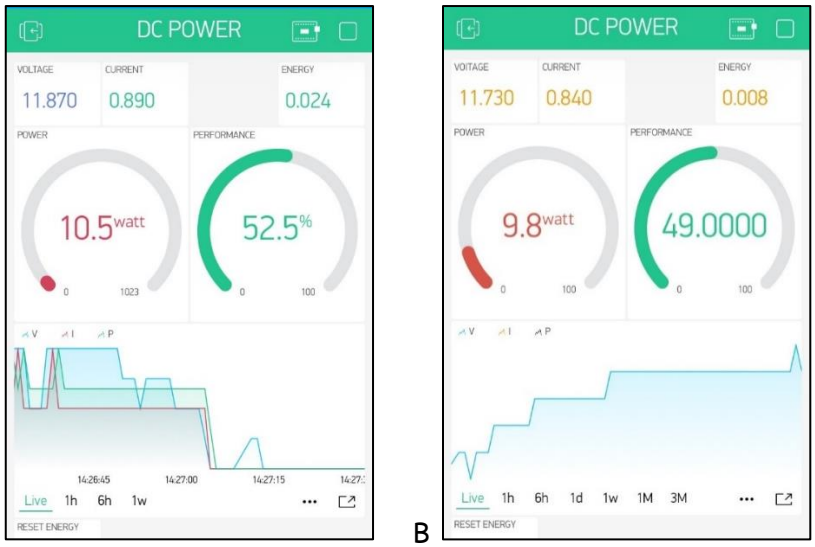
ซึ่งในตารางที่ 4 ได้แสดงผลกรณีการติดตามสมรรถนะแผงผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ PV1 ของชุดวัดที่ 1 พบว่าขณะที่ยังไม่มีสิ่งของบดบังแผง ระดับแรงดันอยู่ที่ 11.94 V กระแสโหลดอยู่ที่ 0.91 A กำลังไฟฟ้าอยู่ที่ 10.80 W โดยเปอร์เซ็นต์การผลิตไฟฟ้าของแผง PV1 อยู่ที่ 54% แต่เมื่อมี

สิ่งของบดบังตามสัดส่วน พบว่าระดับความสามารถในการจ่ายกำลังไฟฟ้าลดลงอย่างต่อเนื่องตามเปอร์เซ็นต์พื้นที่แผงที่ถูกบดบัง

ตารางที่ 5 ผลการศึกษาการติดตามสมรรถนะของแผงผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ของชุดวัดที่ 2

เปอร์เซ็นต์พื้นที่แผงที่ถูกบดบัง	ข้อมูลการตรวจวัดสมรรถนะที่แสดงผลบนสมาร์ทโฟน			
	V	I	W	เปอร์เซ็นต์การผลิตไฟฟ้าของแผง PV2
0	11.73	0.84	9.80	49%
25	11.71	0.66	7.70	37%
50	11.55	0.59	6.80	34%
75	10.86	0.56	6.08	30%
100	9.64	0.06	0.50	2.50%

สำหรับตารางที่ 5 ได้แสดงผลกรณีการติดตามสมรรถนะแผงผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ PV2 ของชุดวัดที่ 2 พบว่าขณะที่ยังไม่มีสิ่งของบดบังแผงระดับแรงดันอยู่ที่ 11.73 V กระแสโหลดอยู่ที่ 0.84 A กำลังไฟฟ้าอยู่ที่ 9.80 W โดยเปอร์เซ็นต์การผลิตไฟฟ้าของแผง PV2 อยู่ที่ 54% แต่เมื่อมีสิ่งของบดบังพบว่าระดับความสามารถในการจ่ายกำลังไฟฟ้าลดลงอย่างต่อเนื่องตามเปอร์เซ็นต์พื้นที่แผงที่ถูกบดบัง โดยตัวอย่างการแสดงผลบนหน้าจอสมาร์ทโฟนนั้นได้แสดงไว้ในภาพที่ 6



A B

ภาพที่ 6 หน้าจอการแสดงผลบนสมาร์ทโฟนด้วยแอพพลิเคชันบลิงค์ (A) เครื่องวัดกำลังไฟฟ้าชุดที่ 1 และ (B) เครื่องวัดกำลังไฟฟ้าชุดที่ 2

4.4 ผลการการตรวจวัดปริมาณกำลังไฟฟ้าสะสม (Wh) ที่โหลด 15 W และการพยากรณ์

ผลการทดสอบการตรวจวัดปริมาณกำลังไฟฟ้าสะสม (Wh) นั้นได้ทำการต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบขนานเพื่อจ่ายไฟให้กับโหลดขนาด 15 W โดยผลการทดสอบได้แสดงไว้ในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ผลการตรวจวัดปริมาณกำลังไฟฟ้าสะสม (Wh) รายชั่วโมงของแต่ละแผง

Hrs. (X)	1	2	3	4	5	Unit
PV 1 (Y1)	6.30	6.50	7.10	6.70	6.40	Wh
PV 2 (Y2)	6.20	6.70	7.20	6.80	6.50	Wh

จากผลการตรวจวัดกำลังไฟฟ้าสะสมของแต่ละแผงในตารางที่ 6 สามารถนำมาสร้างสมการถดถอยเชิงเส้นได้ดังได้แสดงในสมการที่ (3) เพื่อพยากรณ์ความสามารถกำลังผลิตของแผง โดยสมการถดถอยเชิงเส้นของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ 1 และ 2 นั้นสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (6) และ (7) ตามลำดับ โดยค่าการพยากรณ์ในชั่วโมงที่ 6, 7 และ 8 สามารถแสดงผลการพยากรณ์ได้ดังตารางที่ 7

$$Y_1 = 6.48 + 0.04X_1 \quad (6)$$

$$Y_2 = 6.47 + 0.07X_2 \quad (7)$$

ตารางที่ 7 ผลการพยากรณ์กำลังไฟฟ้ารายชั่วโมงของแต่ละแผงที่สามารถผลิตได้ล่วงหน้า 3 ชั่วโมง

Hrs. (X)	6	7	8	Unit
PV 1 (Y1)	6.72	6.76	6.80	Wh
PV 2 (Y2)	6.94	6.94	6.95	Wh
Total	13.66	13.70	13.75	Wh

จากตารางที่ 7 จะทำให้ทราบถึงกำลังผลิตที่จะผลิตได้ของแต่ละแผงและกำลังผลิตโดยรวมของระบบในชั่วโมงถัดไปว่าเป็นเท่าไร เช่น ชั่วโมงที่ 6 ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ 1 กำลังผลิตโดยรวมอยู่ที่ 6.72 Wh สำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ 2 กำลังผลิตโดยรวมอยู่ที่ 6.94 Wh และระบบผลิตไฟฟ้ามีกำลังไฟฟ้าผลิตโดยรวมทั้งหมดอยู่ที่ 13.66 Wh เป็นต้น

ซึ่งเป็นข้อมูลที่มีประโยชน์ในการจัดโหลดในระบบให้เหมาะกับกำลังผลิตโดยเฉพาะหากเป็นโรงผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ขนาดใหญ่ที่มีการเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้ากำลังจะทำให้ระบบสามารถประเมินได้ว่าขีดความสามารถของโรงผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในพื้นที่นั้นมีความสามารถในการ

รองรับโหลดเท่าใด เพื่อใช้เป็นข้อมูลการจัดการและควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าให้เหมาะสมกับการเปลี่ยนแปลงของโหลดในพื้นที่ต่อไป

5. สรุปผลและการอภิปรายผล

เครื่องวัดกำลังไฟฟ้าอัจฉริยะสำหรับติดตามสมรรถนะแผงผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์นี้ได้ถูกออกแบบให้สามารถแสดงผลผ่านสมาร์ทโฟนบนแอพพลิเคชันบลิงค์แบบเรียลไทม์ ซึ่งในการแสดงผลบนหน้าจอสมาร์ทโฟนนั้นจะประกอบไปด้วย ค่าแรงดันไฟฟ้า ค่ากระแสไฟฟ้า ค่ากำลังไฟฟ้า พลังงานไฟฟ้าสะสม และค่าเปอร์เซ็นต์การผลิตไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ นอกจากนี้หากแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ต่ำกว่าค่าที่กำหนดหรือค่ากระแสของแผงสูงกว่าค่าที่กำหนดเครื่องวัดนี้สามารถส่งข้อความแจ้งเตือนไปยังผู้ดูแลระบบได้โดยตรงผ่านทางแอพพลิเคชันไลน์ โดยผลการทดสอบประสิทธิภาพนั้นได้ทำการสร้างเครื่องวัดกำลังไฟฟ้าอัจฉริยะต้นแบบขึ้นมา 2 เครื่องเพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการทำงานของเครื่องโดยผลการทดสอบสามารถสรุปได้ดังนี้ เครื่องวัดชุดที่ 1 สำหรับตรวจวัดแผงที่ 1 โดยค่าความผิดพลาดของแรงดันไฟฟ้าอยู่ที่ 0.45% และค่าความผิดพลาดของกระแสไฟฟ้าอยู่ที่ 1.19% และเครื่องวัดชุดที่ 2 สำหรับตรวจวัดแผงที่ 2 โดยค่าความผิดพลาดของแรงดันไฟฟ้าอยู่ที่ 0.56% และค่าความผิดพลาดของกระแสไฟฟ้าอยู่ที่ 2.50% ซึ่งค่าความผิดพลาดของทั้งสองเครื่องนั้นอาจเกิดขึ้นจากค่าความต้านทานแผงที่เกิดจากการใช้ขนาดสายไฟและอุปกรณ์เชื่อมต่อสำหรับการตรวจวัดค่าต่างๆ ในระบบที่ไม่เหมาะสมซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดค่าผิดพลาดในการวัดได้ และสำหรับการแก้ไขควรมีการเลือกขนาดของสายไฟที่เหมาะสมและอุปกรณ์เชื่อมต่อที่มีคุณภาพ และสำหรับฟังก์ชันการแจ้งเตือนของทั้งสองเครื่องนั้นอยู่ที่ 100 % นอกจากนี้ในการศึกษายังได้ทดสอบการติดตามสมรรถนะการจ่ายพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์โดยทดสอบกรณีเซลล์แสงอาทิตย์นั้นถูกบดบังแสงพบว่าเครื่องวัดกำลังไฟฟ้าอัจฉริยะนี้สามารถติดตามสมรรถนะการผลิตไฟฟ้าของแผงผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์นั้นได้เป็นอย่างดี

ดังนั้นด้วยคุณสมบัติในการติดตามสมรรถนะการจ่ายพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ของเครื่องวัดกำลังไฟฟ้าอัจฉริยะนี้จะสามารถช่วยให้ผู้ดูแลระบบทราบข้อมูลและการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาแบบเรียลไทม์และสามารถนำไปวางแผนในการเข้าตรวจสอบ ซ่อมบำรุงได้ถูกจุดและรวดเร็วขึ้น รวมถึงยังสามารถนำข้อมูลกำลังผลิตมาใช้เป็นข้อมูลในการพยากรณ์กำลังไฟฟ้าสะสมล่วงหน้าได้เพื่อใช้วางแผนในการจัดโหลดในระบบให้เหมาะกับกำลังผลิต และยิ่งไปกว่านั้นยังสามารถช่วยลดความเสี่ยงในการเกิดอุบัติเหตุในการเข้าตรวจซ่อมบำรุงรักษาสำหรับผู้ดูแลได้อีกทาง และสำหรับข้อเสนอแนะในการปรับปรุงระบบนั้นควรมีการประเมินระบบโครงข่ายในการรับส่งข้อมูลและควรมีการเก็บข้อมูลแสงแดดรวมถึงเพิ่มเวลาในการทดสอบเพื่อให้ทราบถึงประสิทธิภาพของแผงได้ดียิ่งขึ้น

6. กิตติกรรมประกาศ

กลุ่มผู้วิจัยขอขอบคุณ สาขาเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ คณะเทคโนโลยีการเกษตรและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และเครื่องมือในการทดสอบและขอขอบคุณคณาจารย์ คณะเทคโนโลยีการเกษตรและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ทุกท่าน ที่ให้คำแนะนำต่างๆ จนกระทั่งงานวิจัยนี้สำเร็จด้วยดี

7. เอกสารอ้างอิง

Albert, G., Diana, L., & David, L. B. T. (2020). Real time online monitoring of solar power plants voltage, current, power, and efficiency to Smartphone, Web, and Email. **International Journal of Scientific & Technology Research**, 9(10), 80-86.

Aparupa, S., Vishal, B., Sujay, S., Rohit, K., & Rajendra, G. (2018). Design of solar rooftop plant for JSSATEN. **International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)**, 5(6), 1186-1192.

Benjamin, O. O., Omolola, A. O., & Nnamdi, N. (2022). Solar panels dirt monitoring and cleaning for performance improvement: A systematic review on smart systems. **Sustainability**, 14, 1-27.

Lavanya, D., Abarna, M., Janani, M., & Preethika, K. (2019). Solar panel monitoring system using smart phone technology. International Journal of Advanced Research in Electrical, **Electronics and Instrumentation Engineering**, 8(3), 560-566.

Fatmah, A. M., Mariam, M., & Yomna, O. S. (2022). Integration of solar energy supply on smart distribution board based on IoT system. **Designs**, 6, 1-9.

Ghedhan, B., Fengshou, G., Laith, F., & Andrew, B. (2022). Enhancing virtual real-time monitoring of photovoltaic power systems based on the internet of things. **Electronics**, 11, 1-16.

Isha, M. S., & Sunita, S. B. (2019). Solar panel monitoring and energy prediction for smart solar system. **International Journal of Advances in Applied Sciences**, 8(2), 136-142.

Monika, P. T. & Nilesh, C. (2019). An IOT based smart solar photovoltaic remote monitoring system. **International Journal of Engineering Research & Technology**, 8(9), 235-240.

Muhammad, S. M. N., & Mohd, H. H. M. R. (2022). Development of dual axis solar tracker with IoT monitoring system. **Journal of Engineering Technology**, 10, 156-162.

Narumon, W., & Chaisit, W. (2022). A real-time prototype of a water level monitor and wide area early flood warning. **SNRU Journal of Science and Technology**, 14(1), 19-24.

Opeyeolu, T. L., & Moyahabo, D. R. (2021). Efficiency Improvement in polycrystalline solar panel using thermal control water spraying cooling. **Procedia Computer Science**, 180, 239–248.

Sheikh, H. C., Nazmul, H., Sakil, A., & Abu, Z. Md. T. I. (2021). A study of IOT based real-time solar power remote monitoring system. **International Journal of Ambient Systems and Applications**, 9, 27-36.

Waheb, A. J., Sanmathy, A., Tajul, A. A. R., & Muhd, F. M. F. (2022). Smart energy meter based on a long-range wide-area network for a stand-alone photovoltaic system. **Expert Systems with Applications,** 197, 1-18.

Weerathum, C., & Somchat, S. (2022). Applications of energy monitoring using the IoT. **SNRU Journal of Science and Technology**, 14(2), 1-9.

Yuvaraja, M. M., Nagaraj, M. J., Manigandan, T., & Srinath, T. (2017). Design, validation and monitoring of 1MW solar rooftop on-grid PV system. **International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering**, 6(6), 4569-4575.