

การพัฒนาระบบการวัดระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับการศึกษาวิจัย  
โดยใช้แพลตฟอร์มเน็ตพาย

Development of Solar Power Generation Monitoring Systems for Research Studies  
Using NETPIE Platform

ธนกร น้าหอมจันทร์\*

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและพลังงาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย

ตำบลรังสิต อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110

E-mail: Thanakorn@eau.ac.th

Thanakorn Namhormchan\*

Department of Electrical and Energy Engineering, Faculty of Engineering, Eastern Asia University

Pathumthani 12110, Thailand

E-mail: Thanakorn@eau.ac.th

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการพัฒนาระบบการวัดระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับการศึกษาวิจัยโดยใช้แพลตฟอร์มเน็ตพาย เป็นการนำเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งประยุกต์ใช้กับระบบวัดและแสดงผลสำหรับการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวกับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อความสะดวกในการศึกษาวิจัย โดยมีขั้นตอนการทำงาน คือ กลุ่มวงจรวัดค่าทางไฟฟ้า ได้แก่ แรงดัน กระแส และอุณหภูมิแรง จำนวน 2 ชุด และกลุ่มเซนเซอร์วัดค่าทางสภาพแวดล้อม ได้แก่ ความเข้มรังสีอาทิตย์ ความเข้มแสง ความเร็วลม อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ ส่งสัญญาณให้กับตัวประมวลผล NodeMCU ESP32 จำนวน 2 บอร์ด ติดต่อผ่านคลาวด์เซิร์ฟเวอร์ของเน็ตพายด้วยโพรโทคอล MQTT เพื่อให้ระบบวัดสามารถแสดงผลบนคอมพิวเตอร์หรือสมาร์ทโฟนได้ทั้งงานและรีโมททางไกล ผลการทดสอบประเมินผล พบว่า ระบบวัดที่นำเสนอมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยตลอดวันไม่เกินร้อยละ 3 สามารถนำไปใช้สำหรับการศึกษาวิจัยเปรียบเทียบสมรรถนะระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง; โหนด เอ็มซียู อีเอสพี 32; เน็ตพาย

## Abstract

This research presents the developments of a solar power system measurement system for research studies using the NETPIE platform. In addition, there is the application of Internet of Things technology (IoT) to measurement and display systems for research studies related to solar power generation systems for the convenience of research studies. A work process is a group of electrical measurement circuits with two sets of voltage, current, solar panel temperature, and environmental sensors such as solar radiation, ambient light, wind speed, temperature, and relative humidity. Signals are sent to two NodeMCU ESP32 processor boards, communicated via NETPIE cloud servers with MQTT protocol, the measurement systems can be displayed on a computer laptop or smartphone both on-site and remotely. The result of the evaluation test revealed that the proposed measurement system has an all-day Mean Absolute Error (MAE) of less than 3%, which can be effectively used in a research study on the performance of solar power generation systems.

**Keywords:** Internet of Things; Node MCU ESP32; NETPIE

## 1. บทนำ

ในปัจจุบันการวิจัยเกี่ยวกับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ตัวอย่างเช่น Aboagye et al. [1] ได้นำเสนอการศึกษาผลกระทบของปัญหาจากการออกแบบ การติดตั้ง การใช้งาน และการบำรุงรักษาต่อสมรรถนะและความเสื่อมสภาพของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้ง ตัวอย่างการศึกษาผลกระทบ ได้แก่ ลักษณะการติดตั้ง มุมเอียง การบังเงาจากต้นไม้และอาคาร และความสะอาดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เป็นต้น Arenandan et al. [2] ได้เสนอเทคนิคการเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตพลังงานไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยการติดตั้งหลังคาสีเขียว โดยเปรียบเทียบกำลังผลิตของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ขนาด 1 กิโลวัตต์ ระหว่างแผงที่ติดตั้งบนหลังคาปกปิดเปรียบเทียบกับแผงที่ติดตั้งบนหลังคาสีเขียว ซึ่งทำการปลูกต้นคุณนายต้นสายที่มีความสูงแตกต่างกันเพื่อสร้างความชื้นสัมพัทธ์บริเวณใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ และ ธนากร น้ำหอมจันทร์ [3] นำเสนอการเพิ่มกำลังผลิตของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์โดยการจัดเรียงตำแหน่งใหม่ของอาร์เรย์ภายใต้เงื่อนไขการบังเงาบางส่วนโดยใช้เทคนิคการเลื่อนแถวของเมจิสแควร์ ซึ่งเป็นเทคนิคการจัดเรียงจตุรัสกลวิธีสยาม คิดค้นโดย ชีมง เดอ ลา ลูแบร์ ขณะเดินทางมาราชอาณาจักรสยามเมื่อปี ค.ศ. 1687 เป็นต้น ส่วนที่สำคัญของการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับสมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์สิ่งหนึ่งคือระบบวัดและแสดงผล ที่สามารถวัดและแสดงพารามิเตอร์ต่างๆ ซึ่งส่งผลกระทบต่อสมรรถนะของระบบที่สนใจ โดยมีตัวอย่างงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เช่น Watjanatepin [4] ได้นำเสนอระบบ Data-Acquisition (DAQ) สำหรับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระโดยใช้ LabVIEW ทำการทดสอบกับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ขนาด 450 Wp จำนวน 1 ระบบ วัดและแสดงผลค่าทางไฟฟ้า ได้แก่ แรงดัน และกระแสไฟฟ้า ค่าทาง

สภาพแวดล้อมที่วัด คือ ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ ซึ่งใช้ DAQ NI 9229, NI 9215, NI 9225 และ NI 9203 สำหรับวัดพารามิเตอร์ต่างๆ ธนกร น้าหอมจันทร์ [5] ได้นำเสนอการพัฒนาระบบการวัดระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อการศึกษาวิจัย ซึ่งพัฒนาจาก [4] โดยใช้ DAQ รุ่นประหยัด NI USB-6008 จำนวน 2 เครื่อง เครื่องที่ 1 สำหรับวัดค่าทางไฟฟ้า ได้แก่ แรงดันและกระแสไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และอุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยสามารถวัดได้ 2 ระบบ ทำการทดสอบกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 250 Wp และ 100 Wp และเครื่องที่ 2 สำหรับวัดค่าทางสภาพแวดล้อม ได้แก่ ความเข้มรังสีอาทิตย์ ความเข้มแสง อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์และความเร็วลม โดยที่ [4-5] เป็นระบบวัดที่ใช้คอมพิวเตอร์เป็นฐานการวัดผลทำได้เฉพาะที่หน้างานเท่านั้น ปัจจุบันมีงานวิจัยเกี่ยวกับการพัฒนาระบบให้ใช้อินเทอร์เน็ตเป็นฐาน เพื่อให้ระบบสามารถวัดและแสดงผลทั้งหน้างานและรีโมทได้ เช่น Srinivasan et al. [6] ได้นำเสนอระบบวัดและแสดงผลพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (Internet of Things: IoT) ซึ่งใช้บอร์ด Arduino Uno เป็นตัวประมวลผล เชื่อมต่อเข้ากับคลาวด์เซิร์ฟเวอร์ โดยใช้บอร์ด Raspberry Pi วัดและแสดงผลค่าทางไฟฟ้า ได้แก่ แรงดัน กระแส และคำนวณค่ากำลังไฟฟ้า จำนวน 1 ระบบ และค่าทางสภาพแวดล้อม คือ อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ Oukennou et al. [7] ได้นำเสนอระบบวัดแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบประหยัด โดยใช้ NodeMCU ESP8266 เป็นตัวประมวลผล ซึ่งมีโมดูล WiFi ในตัวทำให้มีราคาประหยัดกว่าการใช้บอร์ด Arduino Uno ร่วมกับบอร์ด Raspberry Pi ใช้แอปพลิเคชัน IoT เชื่อมต่อผ่านโพรโทคอล Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) วัดและแสดงผลค่าทางไฟฟ้า คือ แรงดัน กระแส และคำนวณค่ากำลังไฟฟ้า จำนวน 1 ระบบ Sutikno et al. [8] ได้นำเสนอระบบวัดและแสดงผลระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งใช้ NodeMCU ESP8266 เป็นตัวประมวลผล โดยใช้ IoT เป็นฐาน วัดและแสดงผลค่าทางไฟฟ้า คือ แรงดัน กระแส และคำนวณค่ากำลังไฟฟ้า จำนวน 1 ระบบ และค่าทางสภาพแวดล้อม คือ อุณหภูมิและความเข้มรังสีอาทิตย์ เป็นต้น

จากงานวิจัยข้างต้นจึงมีแนวคิดที่จะพัฒนาระบบการวัดระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ [5] ซึ่งสามารถวัดและแสดงผลค่าทางไฟฟ้าและอุณหภูมิแผงได้ 2 ระบบพร้อมกัน และสามารถวัดและแสดงผลค่าทางสภาพแวดล้อมครอบคลุมพฤติกรรมการผลิตไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นระบบที่ใช้ IoT เป็นฐาน โดยใช้ NodeMCU เป็นตัวประมวลผล เชื่อมต่อเข้ากับคลาวด์เซิร์ฟเวอร์ผ่านโพรโทคอล MQTT บนแพลตฟอร์มของเน็ตพาย (NETPIE: Network Platform for Internet of Everything) เพื่อให้ระบบสามารถวัดและแสดงผลได้ทั้งหน้างานและรีโมททางไกลได้ [9]

## 2. การดำเนินการวิจัย

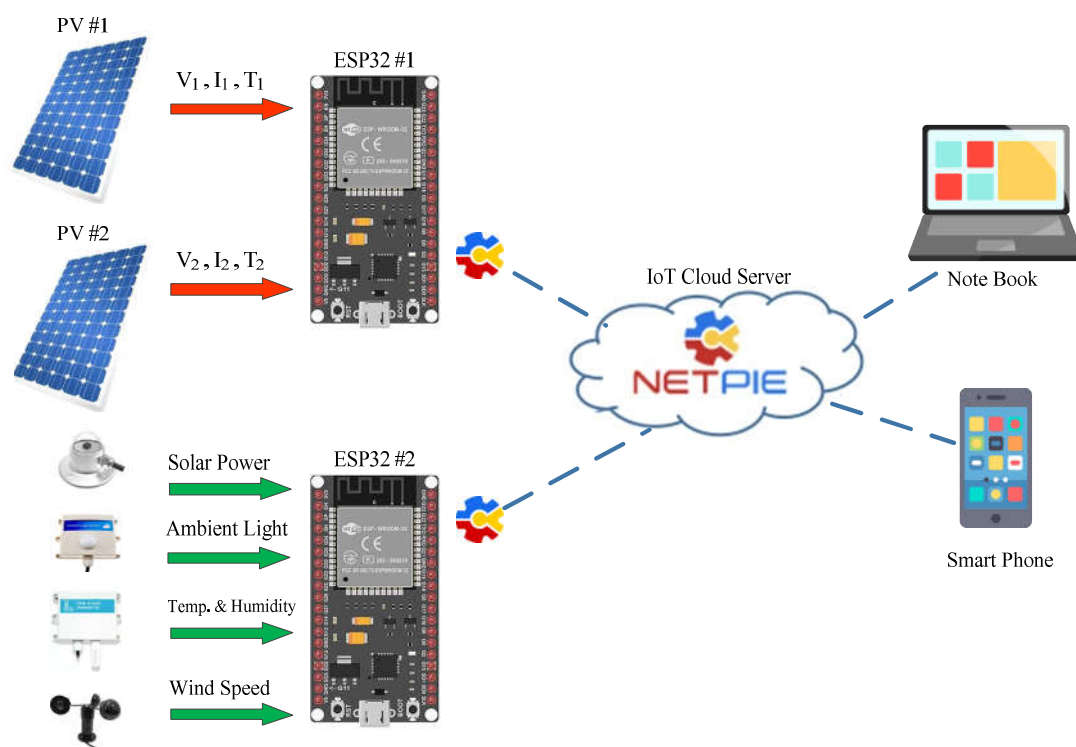
### 2.1 ข้อกำหนดการออกแบบระบบ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบการวัดระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับการศึกษาวิจัย [5] ให้เป็นระบบที่ใช้ IoT เป็นฐาน โดยใช้ NodeMCU ESP32 เป็นตัวประมวลผล ซึ่ง ESP32 ได้รับการพัฒนามาจาก ESP8266 ให้มีชิพประมวลผลแบบแกนคู่ ความเร็ว 160-240 MHz มีโมดูล WiFi ในตัว 802.11n

ความถี่ 2.4 GHz ความเร็วสูงสุด 150 Mbps และ ADC ความละเอียด 12 bit ในขณะที่ ESP8266 มีซีพียูประมวลผลแกนเดียว ความเร็ว 80 MHz และ ADC ความละเอียด 10 bit [10] ออกแบบให้ใช้ ESP32 จำนวน 2 บอร์ด โดยใช้สำหรับวัดค่าทางไฟฟ้าบอร์ดหนึ่ง ซึ่งติดตั้งใกล้กับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต้องการจะวัด และใช้สำหรับวัดค่าทางสภาพแวดล้อมอีกบอร์ดหนึ่ง ซึ่งติดตั้งรวมกับเป็นชุดเดียวกับกลุ่มเซนเซอร์สำหรับวัดค่าทางสภาพแวดล้อม เพื่อป้องกันการบังเงาบางส่วนของกลุ่มเซนเซอร์สำหรับวัดค่าทางสภาพแวดล้อมต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยเชื่อมต่อเข้ากับคลาวด์เซิร์ฟเวอร์ของ NETPIE เพื่อให้สามารถวัดแสดงผลได้ทั้งหน้างานและรีโมททางไกลได้ โดยระบบจะสามารถวัดและแสดงผลค่าทางไฟฟ้า และอุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้ 2 ระบบ เพื่อให้สามารถศึกษาสมรรถนะของระบบทั้ง 2 ได้พร้อมกัน วัดและแสดงผลค่าทางสภาพแวดล้อมครอบคลุมปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นระหว่างการทดสอบสมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

## 2.2 การออกแบบ

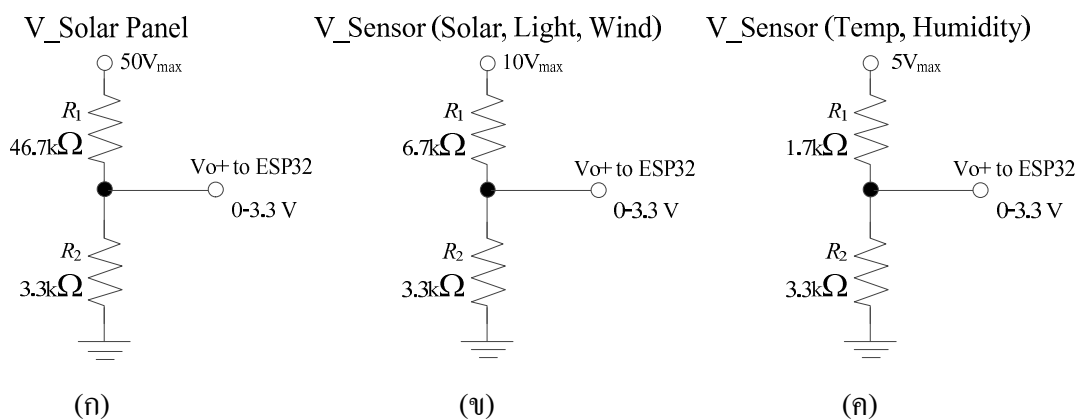
โครงสร้างการทำงานของระบบการวัดระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับการศึกษาวิจัย แสดงดังรูปที่ 1 โดยใช้ NodeMCU ESP32-WROOM-32 ซึ่งสามารถวัดค่าแรงดันไฟฟ้าแอนะล็อกได้ในช่วง 0-3.3 V [11] จำนวน 2 บอร์ด โดยมีรายละเอียด ดังนี้



รูปที่ 1 โครงสร้างการทำงานของระบบการวัดระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับการศึกษาวิจัย

บอร์ด ESP32 #1 สำหรับวัดค่าทางไฟฟ้า ได้แก่ แรงดัน กระแสไฟฟ้า และอุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์ จำนวน 2 ชุด ส่วนค่ากำลังไฟฟ้าจะทำการคำนวณจากค่าแรงดันและกระแสที่วัดได้

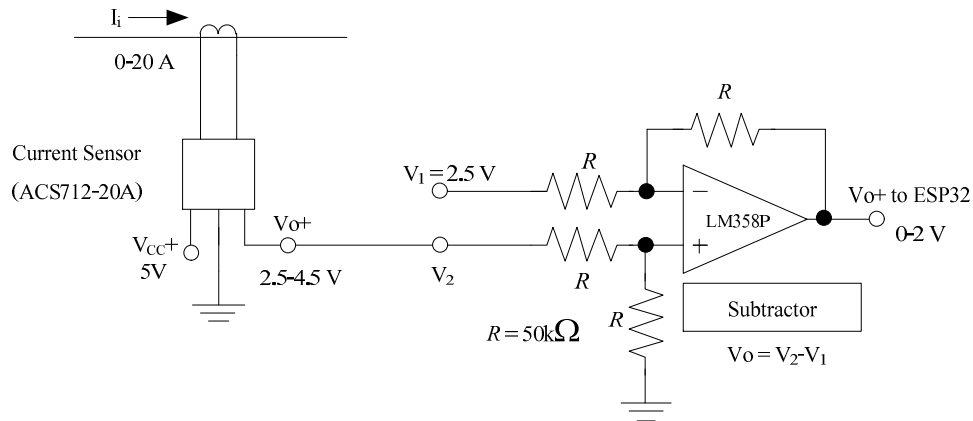
การวัดแรงดันไฟฟ้าจะใช้วงจรแบ่งแรงดันเพื่อลดทอนแรงดันขาออกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้อยู่ในช่วง 0-3.3 V สอดคล้องกับพิสัยแรงดันขาเข้าของ ESP32 การออกแบบวงจรแบ่งแรงดันสำหรับการวัดแรงดันพิจารณาจาก พิกัดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในการทดสอบเก็บผล ในงานวิจัยนี้ใช้แผง Solar Land SLP250-20 (250 W) [12] และ Zhejiang Kingdom Solar Energy Technic KD -M100 (100 W) ดังนั้น จะ ออกแบบ ให้ สอดคล้องกับแผงพิกัด 250 W ซึ่งมีพารามิเตอร์ที่สำคัญ ดังนี้  $V_{oc}$  37.54V และ  $I_{sc}$  8.84A จากแรงดัน  $V_{oc}$  ออกแบบ เพื่อความปลอดภัยที่ 125% จะได้ 46.95 V เพื่อความสะดวกในการคำนวณ ดังนั้น ออกแบบที่ระดับแรงดัน 50 V โดยให้มีกระแสไหลผ่านวงจรเพียง 1 mA ดังนั้น จะได้  $R_1 = 46.7 \text{ k}\Omega$ ,  $\frac{1}{4} \text{ W}$  และ  $R_2 = 3.3 \text{ k}\Omega$ ,  $\frac{1}{4} \text{ W}$  แสดงดังรูปที่ 2 (ก)



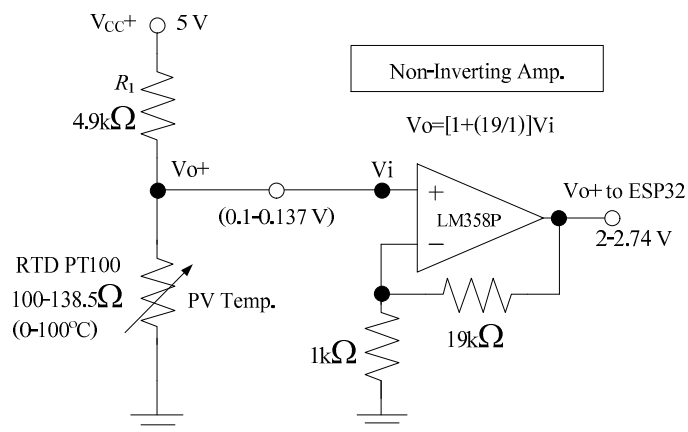
รูปที่ 2 วงจรแบ่งแรงดันที่ใช้ในงานวิจัย (ก) สำหรับวัดแรงดันจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์  
(ข) สำหรับเซนเซอร์ที่มีช่วงแรงดันขาออก 0-10 V (ค) สำหรับเซนเซอร์ที่มีช่วงแรงดันขาออก 0-5 V

การวัดกระแสไฟฟ้าจะใช้โมดูลวัดกระแสไฟฟ้าพิกัด 20 A (ACS712-20A) [13] ซึ่งเป็น โมดูลที่สัญญาณขาเข้าเป็นกระแสที่ต้องการวัดและสัญญาณขาออกเป็นแรงดันไฟฟ้า เมื่อกระแสขาเข้าเท่ากับ 0 A แรงดันขาออกจะเท่ากับ  $V_{cc}/2$  หรือเท่ากับ 2.5 V แรงดันขาออกจะเพิ่มขึ้น 100 mV ต่อกระแสขาเข้าที่เพิ่มขึ้น 1 A ดังนั้น แรงดันขาออกของโมดูลวัดกระแสจะอยู่ในช่วง 2.5-4.5 V เพื่อให้ช่วงแรงดันขาออกของโมดูลวัดกระแสสอดคล้องกับแรงดันขาเข้าของ ESP32 จึงเพิ่มวงจรลบ (Subtractor) ขนาด 2.5 V ซึ่งทำให้แรงดันขาออกอยู่ในช่วง 0-2 V ดังรูปที่ 3

การวัดอุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะใช้ RTD PT100 ซึ่งเป็นเซนเซอร์วัดอุณหภูมิแบบสัมผัสที่ค่าความต้านทานจะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ ดังนี้ ที่อุณหภูมิ  $0^{\circ}\text{C}$  จะมีค่าความต้านทาน  $100 \Omega$  และที่อุณหภูมิ  $100^{\circ}\text{C}$  จะมีค่าความต้านทาน  $138.5 \Omega$  [14] จากช่วงอุณหภูมิและค่าความต้านทานของ RTD ข้างต้น พบว่า ค่าความต้านทานเพิ่มขึ้นเฉลี่ย  $0.39 \Omega/^{\circ}\text{C}$  เพื่อให้ ESP32 สามารถวัดค่าอุณหภูมิได้ จึงใช้วงจรแบ่งแรงดันโดยใช้  $R_1 = 4.9 \text{ k}\Omega$ ,  $\frac{1}{4} \text{ W}$  และ  $R_2 = \text{RTD}$  ที่  $V_{cc} = 5 \text{ V}$  ซึ่งจะได้แรงดันขาออกที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วง  $0-100^{\circ}\text{C}$  เท่ากับ 0.1-0.137 V และเพื่อให้ช่วงแรงดันสอดคล้องกับแรงดันขาเข้าของ ESP32 มากยิ่งขึ้น จึงเพิ่มวงจรขยายแบบไม่กลับเฟส (Non-Inverting Amp.) ที่อัตราขยายแรงดัน ( $A_v$ ) 20 เท่า ดังรูปที่ 4 ดังนั้น จะได้แรงดันขาออกในช่วง 2.0-2.74 V



รูปที่ 3 วงจรสำหรับวัดกระแสไฟฟ้า



รูปที่ 4 วงจรสำหรับวัดอุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์

บอร์ด ESP32 #2 สำหรับวัดค่าทางสภาพแวดล้อม ในงานวิจัยนี้เลือกใช้เซนเซอร์สำเร็จรูปโดยมีย่านการวัดและพิกัดแรงดันขาออก แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 พิกัดของเซนเซอร์วัดสิ่งแวดล้อมที่ใช้ในงานวิจัย [5]

| เซนเซอร์                    | ย่านการวัด                 | แรงดันขาออก |
|-----------------------------|----------------------------|-------------|
| ความเข้มรังสีอาทิตย์        | 0 ~ 1,500 W/m <sup>2</sup> | 0 - 10 V    |
| ความเข้มแสง                 | 0 ~ 200,000 lux            | 0 - 10 V    |
| ความเร็วลม                  | 0 ~ 30 m/s                 | 0 - 10 V    |
| อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ | T: 0 ~ 80 °C, RH: 0 ~ 100% | 0 - 5 V     |

จากตารางที่ 1 จะพบว่า เซนเซอร์วัดความเข้มรังสีอาทิตย์ ความเข้มแสง และความเร็วลมมีพิสัยแรงดันขาออก 0-10 V เซนเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ มีพิสัยแรงดันขาออก 0-5 V เพื่อให้สอดคล้องกับพิสัยแรงดันขาเข้าของ ESP32 จะใช้วงจรแบ่งแรงดันเพื่อลดทอนแรงดันให้อยู่ในช่วง 0-3.3 V ดังรูปที่ 2 (ข)-(ค)

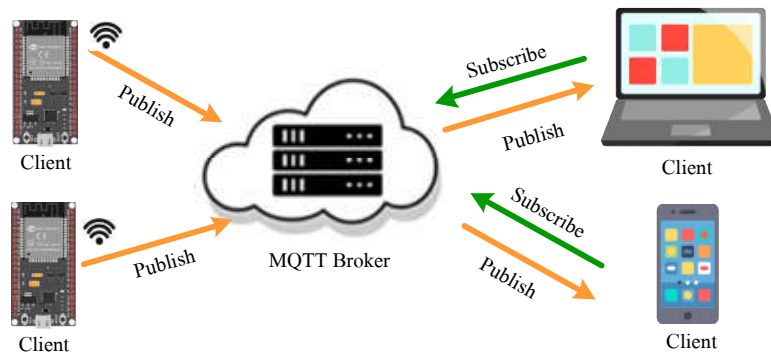
จากย่านการวัด การลดทอนแรงดัน และการดำเนินการทางคณิตศาสตร์ของแรงดันขาออกของเซนเซอร์ต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2-4 จะสามารถคำนวณค่าจากแรงดันขาเข้า ESP32 ( $V_{i\_ESP}$ ) ย้อนกลับไปเป็นค่าทางไฟฟ้าและค่าทางสภาพแวดล้อม โดยใช้แฟลคเตอร์ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แฟลคเตอร์สำหรับคำนวณค่าทางไฟฟ้าและค่าทางสภาพแวดล้อม

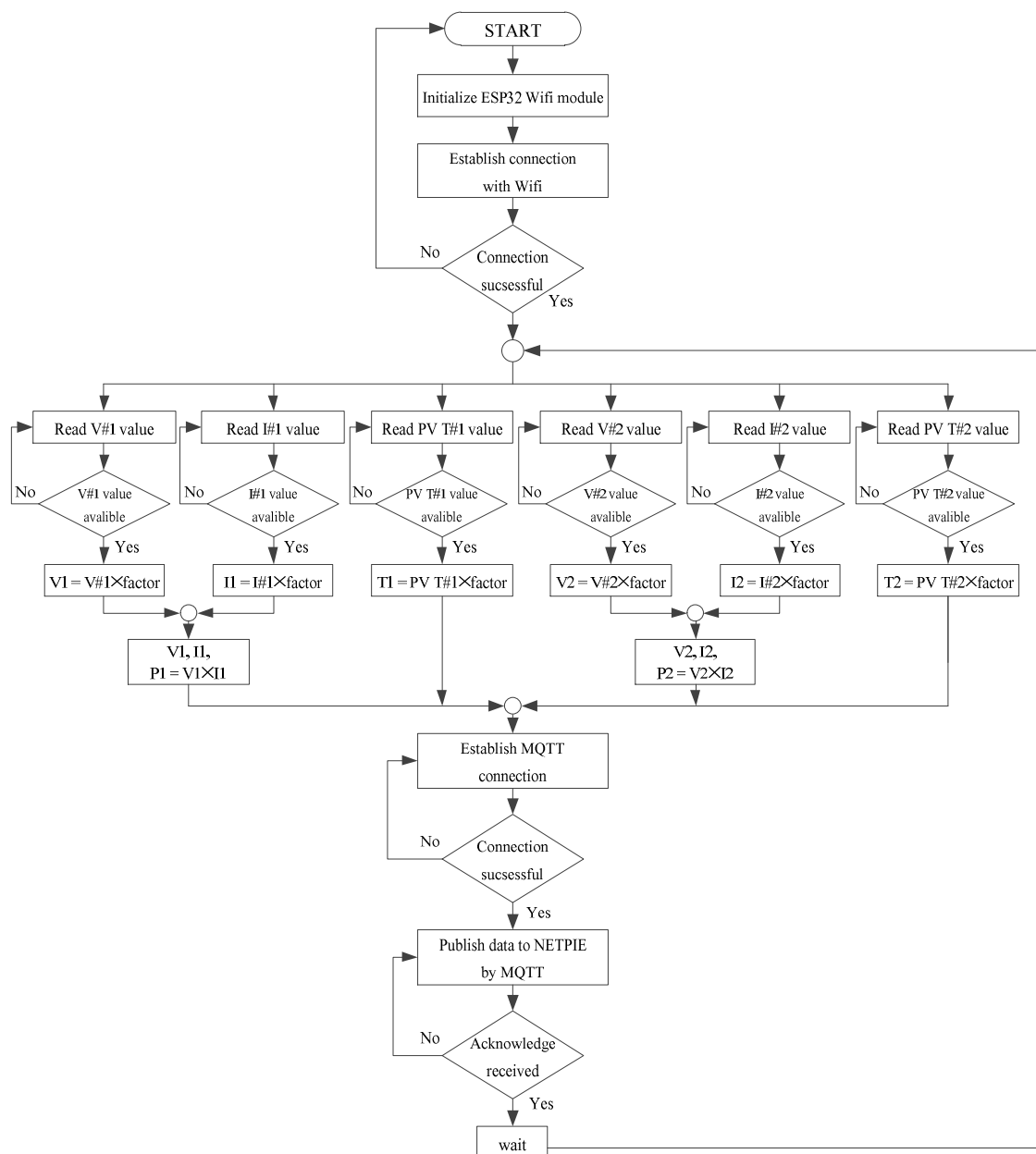
| พารามิเตอร์                    | การดำเนินการ                                                                            | แฟลคเตอร์                                                                                                                                       |                                           |
|--------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|
| แรงดันไฟฟ้า                    | แบ่งแรงดัน $V_o = 0.066 V_i$                                                            | $V = V_{i\_ESP} / 0.066$                                                                                                                        |                                           |
| กระแสไฟฟ้า                     | ลบ 2.5 V จะได้ 100 mV/A                                                                 | $I = V_{i\_ESP} \times 10$                                                                                                                      |                                           |
| กำลังไฟฟ้า                     | -                                                                                       | $P = V \times I$                                                                                                                                |                                           |
| อุณหภูมิ<br>แผงเซลล์แสงอาทิตย์ | แบ่งแรงดัน $V_{cc} = 5 V$<br>$R_1 = 4.9 k\Omega$ , $R_2 = RTD$<br>และขยายสัญญาณ 20 เท่า | $RTD = ((V_{i\_ESP}/100) \times 4.9k) / (1 - (V_{i\_ESP}/100))$<br>; $100 = V_{cc} \times A_v = 5 \times 20$<br>$PV Temp. = (RTD - 100) / 0.39$ |                                           |
|                                |                                                                                         |                                                                                                                                                 |                                           |
| พารามิเตอร์                    | พารามิเตอร์ : $V_o$                                                                     | แบ่งแรงดัน                                                                                                                                      | แฟลคเตอร์                                 |
| ความเข้มรังสีอาทิตย์           | 150 : 1                                                                                 | $V_o = 0.33 V_i$                                                                                                                                | $W/m^2 = V_{i\_ESP} \times (150/0.33)$    |
| ความเข้มแสง                    | 20,000 : 1                                                                              | $V_o = 0.33 V_i$                                                                                                                                | $Lux = V_{i\_ESP} \times (20,000/0.33)$   |
| ความเร็วลม                     | 3 : 1                                                                                   | $V_o = 0.33 V_i$                                                                                                                                | $m/s = V_{i\_ESP} \times (3/0.33)$        |
| อุณหภูมิ                       | 16 : 1                                                                                  | $V_o = 0.66 V_i$                                                                                                                                | $^{\circ}C = V_{i\_ESP} \times (16/0.66)$ |
| ความชื้นสัมพัทธ์               | 20 : 1                                                                                  | $V_o = 0.66 V_i$                                                                                                                                | $\%RH = V_{i\_ESP} \times (20/0.66)$      |

ESP32 ทั้ง 2 บอร์ดเชื่อมต่อผ่านคลาวด์เซิร์ฟเวอร์ของเน็ตพายผ่านโพรโทคอล MQTT ซึ่งเป็นโพรโทคอลสื่อสารชั้นแอปพลิเคชันที่ถูกนำมาใช้แพร่หลายในการสื่อสารแบบ IoT เหมาะกับอุปกรณ์ปลายทางที่มีขนาดเล็ก/พลังงานจำกัด โมเดลการสื่อสารโพรโทคอล MQTT ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ไคลเอนต์ ได้แก่ ตัวประมวลผล ESP32 และส่วนแสดงผล ได้แก่ Note Book/Smart Phone และ โบรกเกอร์ ซึ่งทำหน้าที่เป็นเป็นจุดศูนย์กลางในการรับส่งข้อความระหว่างไคลเอนต์ โมเดลการสื่อสารโพรโทคอล MQTT [15] แสดงดังรูปที่ 5

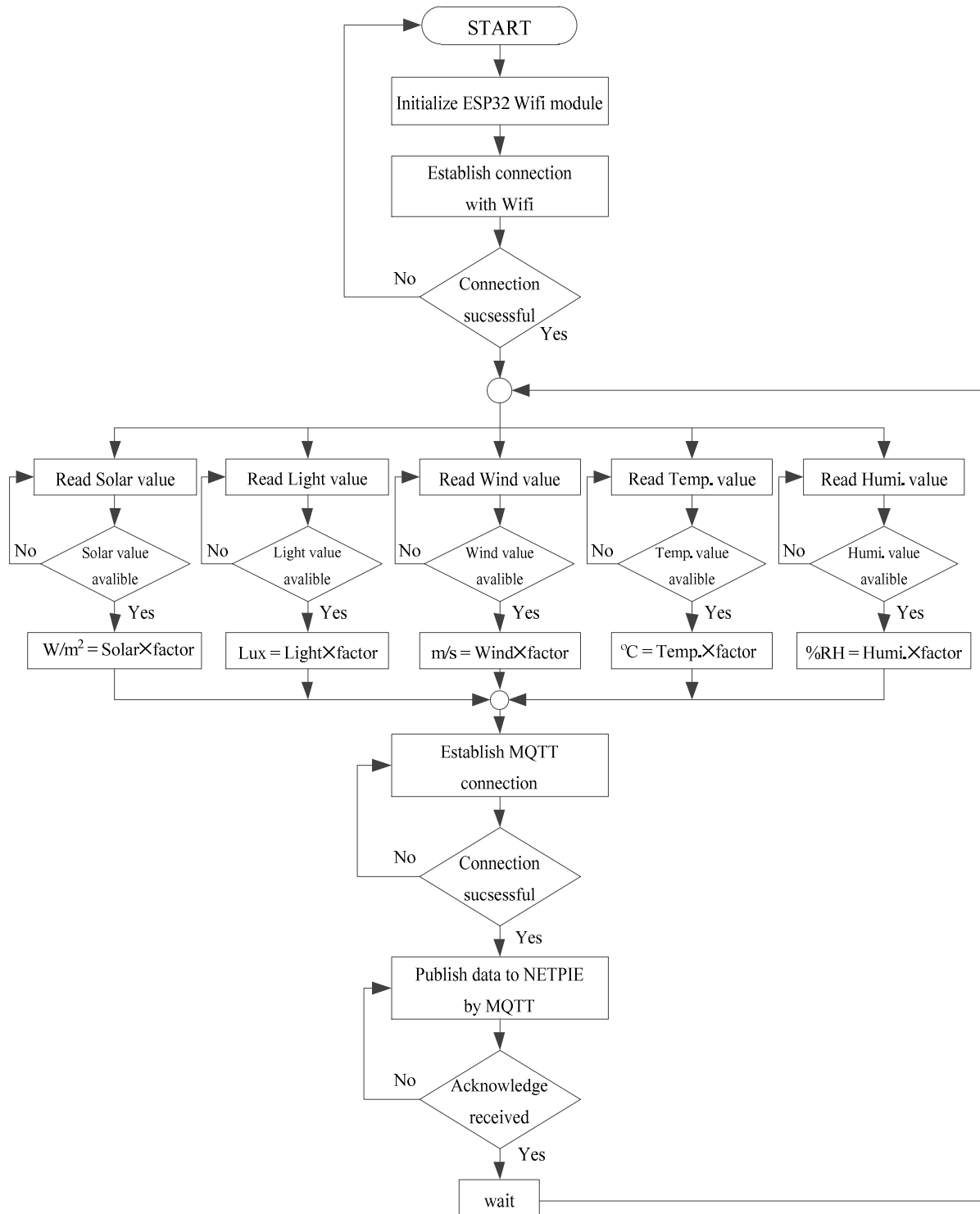
แผนผังการทำงานของระบบวัดและแสดงผลโดยใช้ ESP32 บอร์ดที่ 1 และ 2 แสดงดังรูปที่ 6 และ 7 ซึ่งจะนำแผนผังนี้ไปออกแบบบอร์ดโปรแกรมด้วยซอฟต์แวร์ Arduino IDE [16] และออกแบบหน้าจอแสดงผล (Dashboard) บนแพลตฟอร์มของเน็ตพาย [17] แสดงดังรูปที่ 8



รูปที่ 5 โมเดลการสื่อสารโพรโทคอล MQTT ของ NETPIE



รูปที่ 6 แผนผังการทำงานของระบบวัดและแสดงผลโดยใช้ ESP32 บอร์ดที่ 1



รูปที่ 7 แผนผังการทำงานของระบบวัดและแสดงผลโดยใช้ ESP32 บอร์ดที่ 2

หน้าจอแสดงผลบนแพลตฟอร์มของเน็ตพายที่ออกแบบ ประกอบไปด้วย 3 ส่วน ดังนี้ 1) ส่วนแสดงผลค่าแรงดัน กระแส กำลังไฟฟ้า และอุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์แผงที่ 1 โดยที่ค่าแรงดัน กระแส และอุณหภูมิแผงออกแบบให้แสดงผลเป็นตัวเลข และกำลังไฟฟ้าออกแบบให้แสดงผลเป็นเกจ 2) ส่วนแสดงผลค่าแรงดัน กระแส

กำลังไฟฟ้า และอุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์แผงที่ 2 โดยออกแบบให้แสดงผลเช่นเดียวกับแผงที่ 1 ซึ่ง 1) และ 2) รับค่ามาจาก ESP32 บอร์ดที่ 1 และ 3) ส่วนแสดงผลค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ ความเข้มแสง ความเร็วลม อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ โดยออกแบบให้แสดงผลเป็นตัวเลข ซึ่ง 3) รับค่ามาจาก ESP32 บอร์ดที่ 2



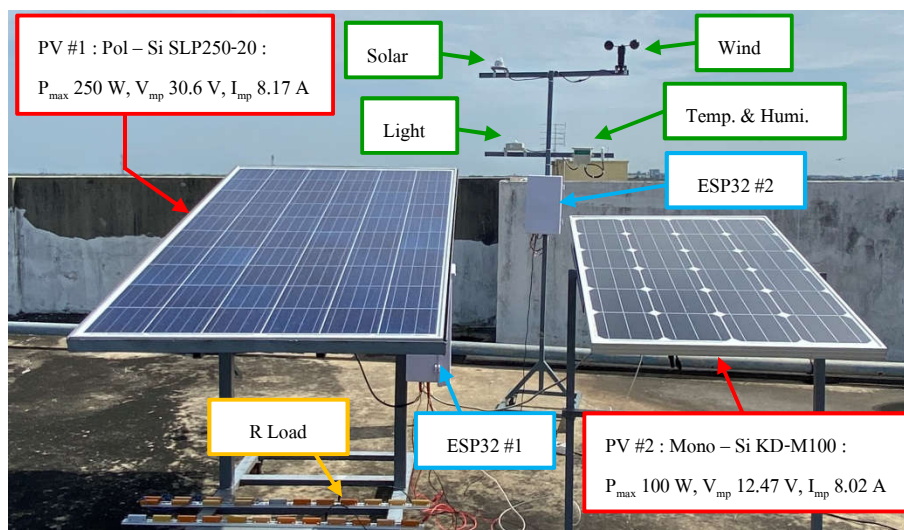
รูปที่ 8 หน้าจอแสดงผลบนแพลตฟอร์มของเน็ตพายที่ออกแบบ

### 3. การทดสอบและผลการทดสอบ

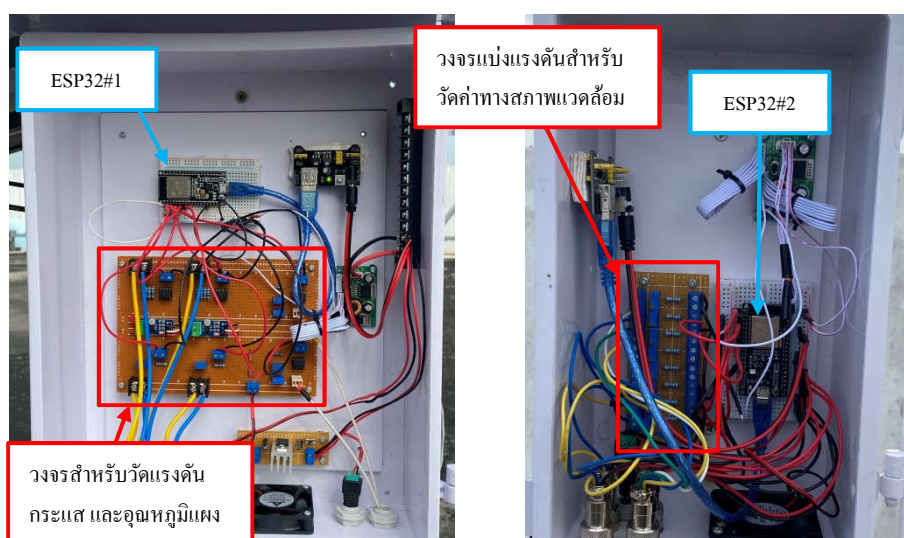
ทำการทดสอบประเมินผลระบบวัดและแสดงผลที่ได้ออกแบบ เมื่อวันที่ 16 พฤษภาคม พ.ศ. 2565 เวลา 09:00 – 16:00 น. บนดาดฟ้า อาคารชวน ชวนิชย์ (อาคาร 6 ชั้น) มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย จังหวัดปทุมธานี โดยใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ จำนวน 2 แผง ที่มีพิกัดแตกต่างกัน ดังนี้ พิกัด 250 W และ 100 W เพื่อทดสอบการวัดผล และแสดงผลระบบที่ระดับแรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้าแตกต่างกัน แสดงดังรูปที่ 9 ตัวประมวลผล ESP32 ทั้ง 2 บอร์ดและวงจรการวัดสัญญาณที่ออกแบบแสดงดังรูปที่ 10

การประเมินผลระบบวัดผลและแสดงผลบนแพลตฟอร์มของเน็ตพาย ซึ่งทำการวัดผล และแสดงผลอย่างต่อเนื่อง เปรียบเทียบกับการวัดผลโดยใช้มิเตอร์ ซึ่งทำการสุ่มวัดทุกๆ 15 นาที เพื่อพิจารณาความคลาดเคลื่อนของระบบวัด มิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบเก็บผลมีคุณสมบัติแสดงดังตาราง 3 ผลการทดสอบประเมินผลของ ESP32 บอร์ดที่ 1 แรงดัน กระแส กำลังไฟฟ้า และอุณหภูมิแผง ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 2 แผง แสดงดังรูปที่ 11 ผลการทดสอบประเมินผลของ ESP32 บอร์ดที่ 2 ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ ความเข้มแสง อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความเร็วลม แสดงดังรูปที่ 12 การแสดงผลบนแพลตฟอร์มเน็ตพาย แสดงดังรูปที่ 13

จากการทดสอบประเมินผล พบว่า ระบบสามารถวัดและแสดงผลได้ใกล้เคียงกับที่วัดโดยใช้มิเตอร์ โดยมีค่าคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (Mean Absolute Error: MAE) จากการสุ่มวัดทุก 15 นาทีตลอดวัน ไม่เกินร้อยละ 3 ดังแสดงในตาราง 4



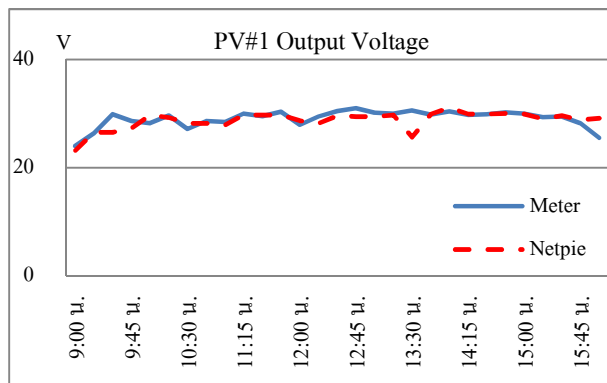
รูปที่ 9 การทดสอบระบบการวัดระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับการศึกษาวิจัย



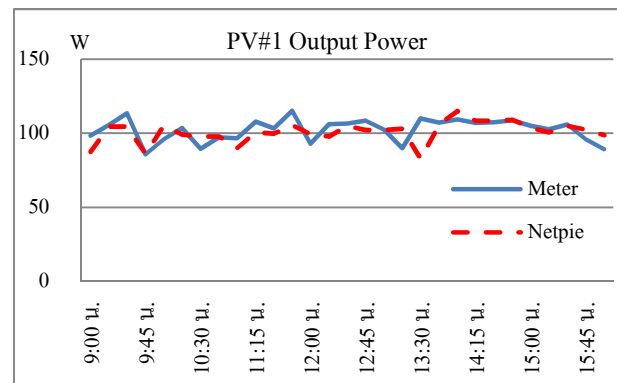
รูปที่ 10 ESP32 ทั้ง 2 บอร์ดและวงจรการวัดสัญญาณ

ตาราง 3 พิกัดของเครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดสอบประเมินผล [5]

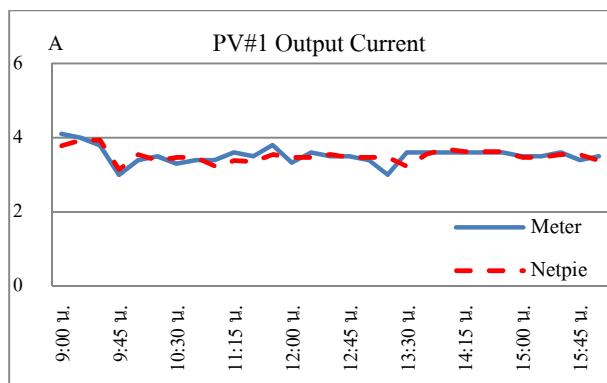
| ประเภท                     | รุ่น              | ย่านการวัด                                      | ความแม่นยำ                                                     |
|----------------------------|-------------------|-------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| Solar Power Meter          | Lutron SPM-1116SD | 0 ~ 2,000 W/m <sup>2</sup>                      | ± 10 W/m <sup>2</sup>                                          |
| Anemometer<br>and Air Flow | Lutron LM-9000    | 0.4 ~ 30.0 m/s<br>10 ~ 95% RH<br>-100 ~ 1300 °C | ± 3% F.S. (≤ 20 m/s)<br>± 4 %RH (< 70% RH)<br>± (1% rdg + 1°C) |
| Light Meter                | Lutron LX-11128SD | 0 ~ 100,000 Lux                                 | ± (4% + 2 dgt)                                                 |
| True RMS Multimeter        | Fluke 115         | 0 ~ 600 V                                       | ± ([% of reading] + [counts]): 0.5% + 2                        |
| TRMS Clamp Meter           | Fluke 375 FC      | 0 ~ 600 A                                       | 2% ± 5 digits (10 Hz to 100 Hz)                                |
| IR Thermometer             | Fluke 62 Mini     | -30 ~ 500 °C                                    | ± 1.5°C or ± 1.5% of reading                                   |



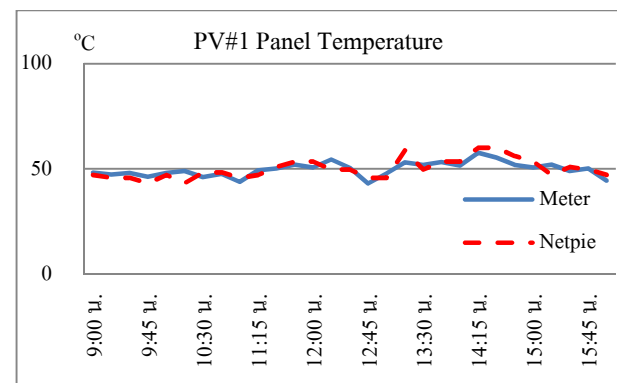
(ก) แรงดันไฟฟ้า PV#1



(จ) กำลังไฟฟ้า PV#1

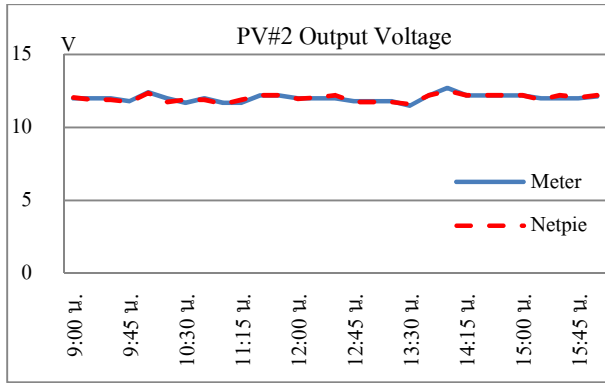


(ค) กระแสไฟฟ้า PV#1

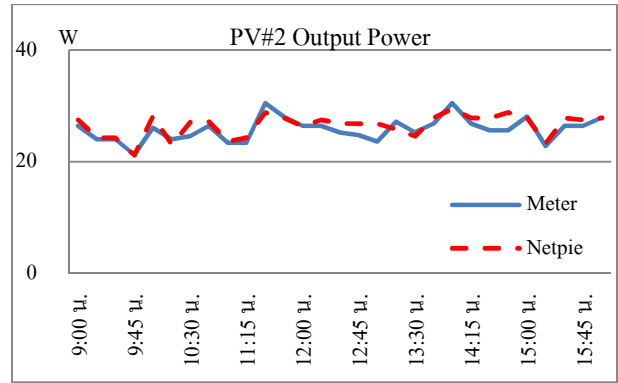


(ช) อุณหภูมิแผง PV#1

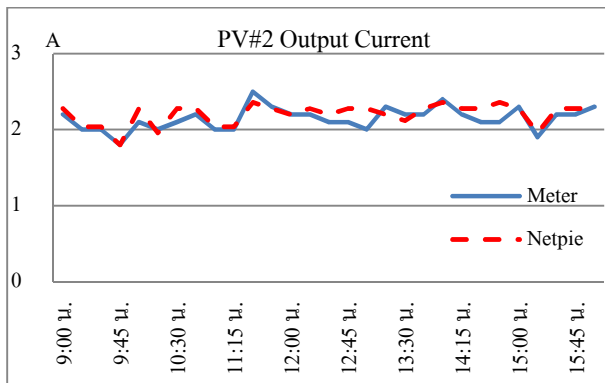
ธนาคาร น้ำหอมจันทร์ / วารสารวิชาการปฐมวัน ปีที่ 12 ฉบับที่ 35 กันยายน-ธันวาคม 2565



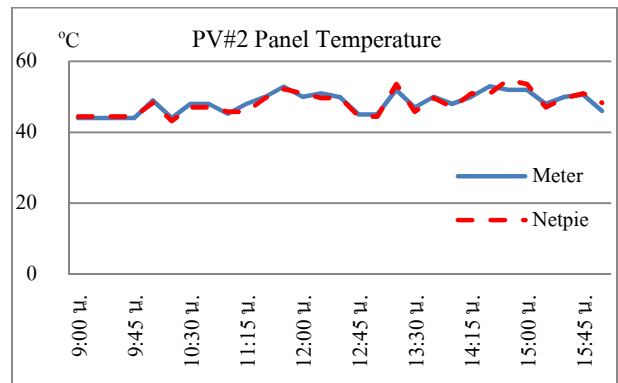
(ข) แรงดันไฟฟ้า PV#2



(ค) กำลังไฟฟ้า PV#2

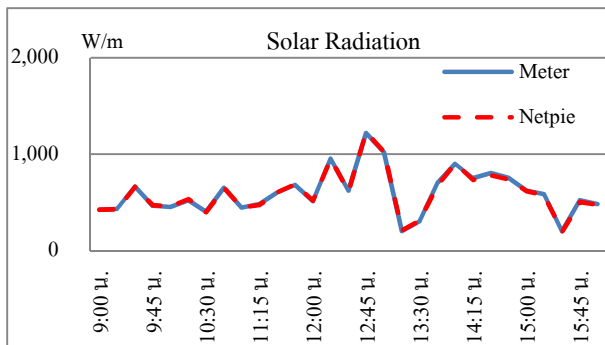


(ง) กระแสไฟฟ้า PV#2

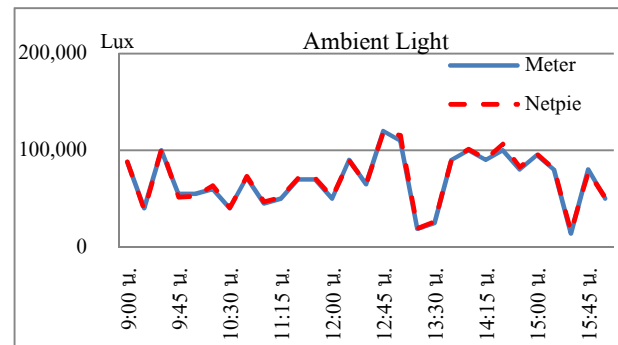


(จ) อุณหภูมิแผง PV#2

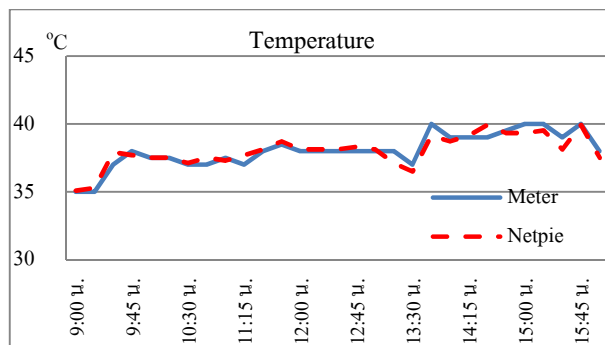
รูปที่ 11 ผลการทดสอบประเมินผลของ ESP32 บอร์ดที่ 1



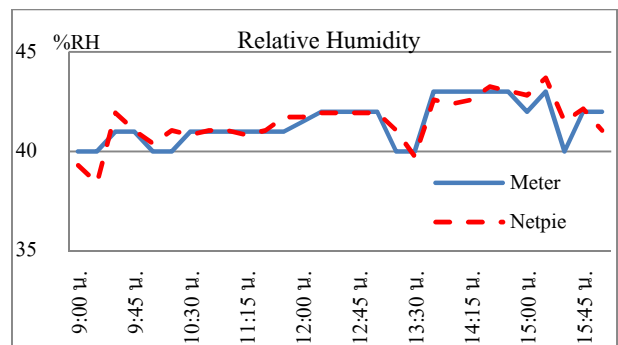
(ก) ความเข้มรังสีอาทิตย์



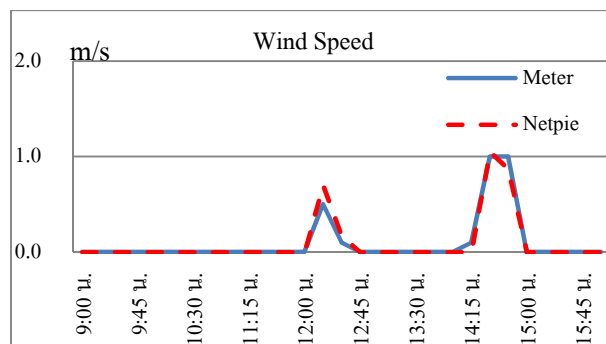
(ข) ความเข้มแสง



(ค) อุณหภูมิ

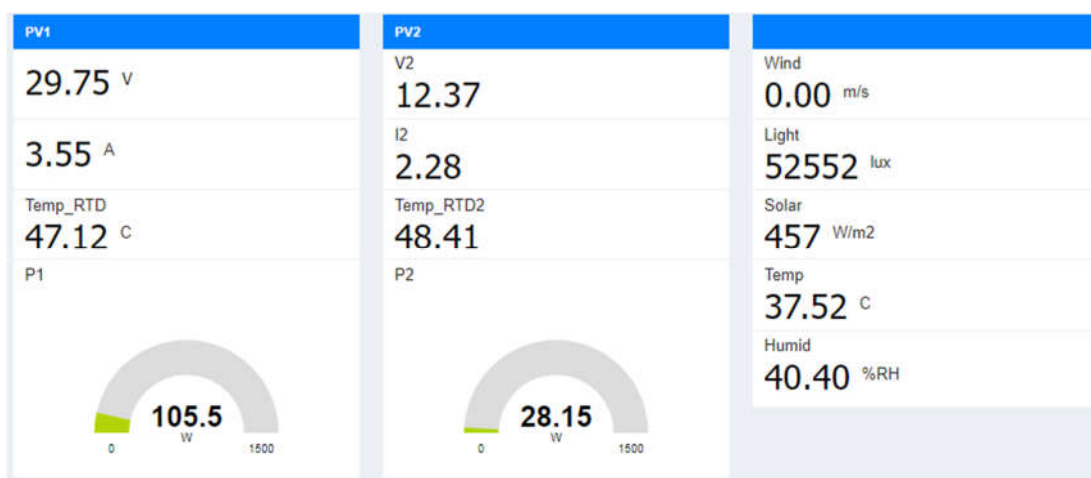


(ง) ความชื้นสัมพัทธ์

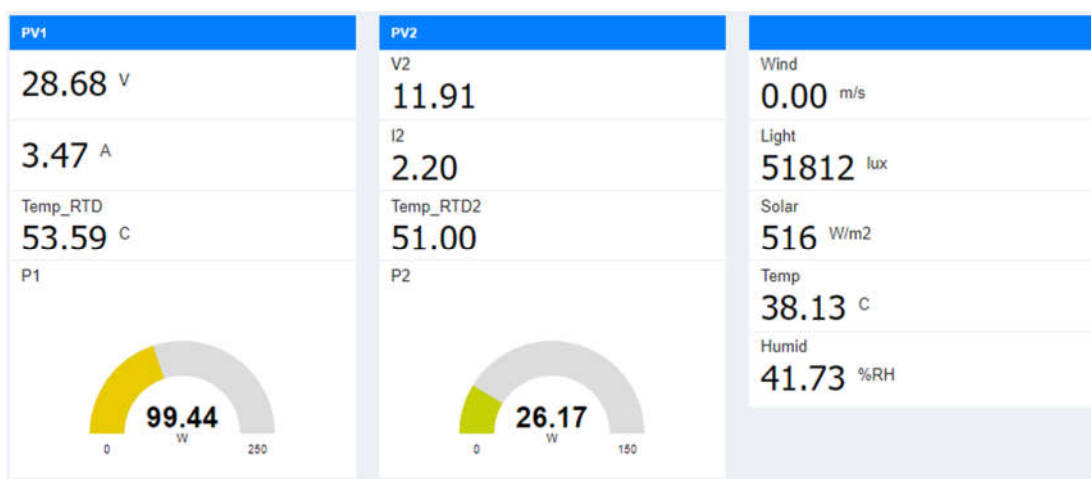


(จ) ความเร็วลม

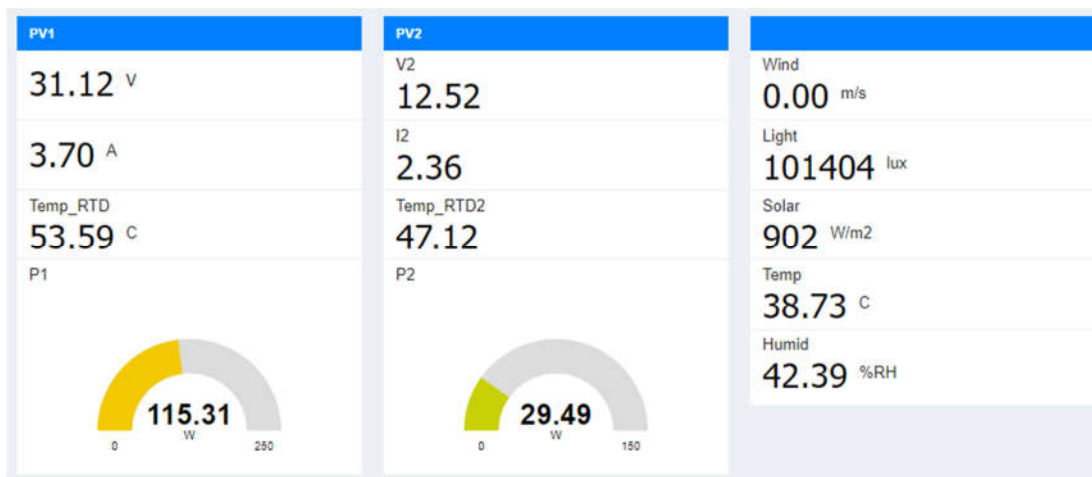
รูปที่ 12 ผลการทดสอบประเมินผลของ ESP32 บอร์ดที่ 2



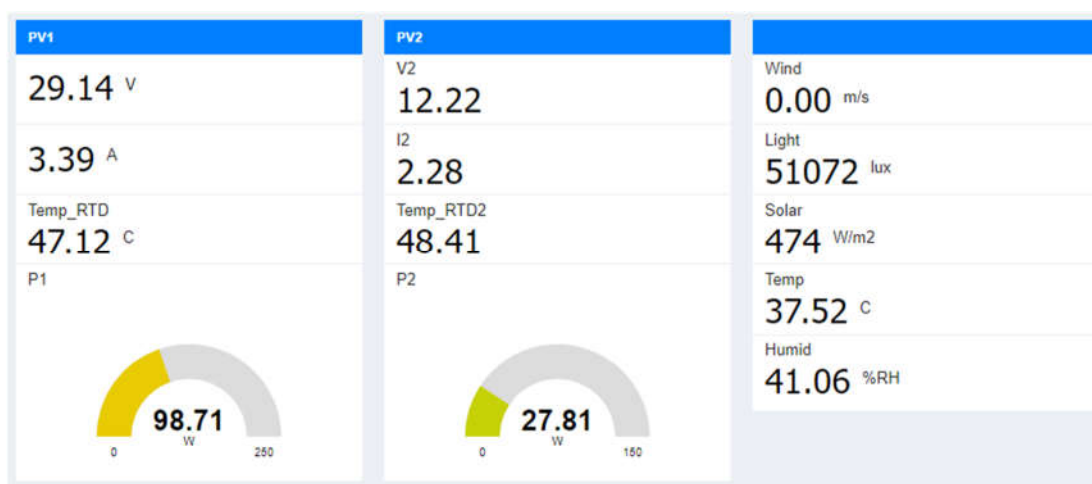
(ก) เวลา 10:00 น.



(ข) เวลา 12:00 น.



(ค) เวลา 14:00 น.



(ง) เวลา 16:00 น.

รูปที่ 13 ตัวอย่างการแสดงผลบนแพลตฟอร์มเน็ตพาย วันที่ 16 พฤษภาคม พ.ศ. 2565

ตาราง 4 ค่าความคลาดเคลื่อนตลอดวันของระบบที่ออกแบบเปรียบเทียบกับมิเตอร์

| พารามิเตอร์ | ความคลาดเคลื่อน (%) | พารามิเตอร์ | ความคลาดเคลื่อน (%) |
|-------------|---------------------|-------------|---------------------|
| Voltage 1   | 0.85                | Solar       | 0.23                |
| Current 1   | 0.10                | Light       | 1.73                |
| Power 1     | 0.89                | Wind        | 0.07                |
| Voltage 2   | 0.09                | Temp.       | 0.04                |
| Current 2   | 2.83                | Humi.       | 0.24                |
| Power 2     | 2.93                | PV_Temp. 1  | 0.66                |
|             |                     | PV_Temp. 2  | 0.04                |

#### 4. บทสรุป

จากการพัฒนาระบบการวัดระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับการศึกษาวิจัยจากระบบที่ใช้คอมพิวเตอร์เป็นฐานให้เป็นระบบที่ใช้อินเทอร์เน็ตเป็นฐาน โดยใช้ NodeMCU ESP32 ซึ่งเป็นตัวประมวลผลประสิทธิภาพสูง ราคาประหยัด ออกแบบสร้างวงจรสำหรับวัดค่าต่าง ๆ ทางไฟฟ้า และวงจรที่ช่วยให้เซนเซอร์วัดค่าทางสภาพแวดล้อมต่าง ๆ สามารถใช้งานร่วมกับ ESP32 ได้ ระบบวัดที่ออกแบบเชื่อมต่อคลาวด์เซิร์ฟเวอร์ผ่านแพลตฟอร์มของเน็ตฟายได้ตามข้อกำหนดการออกแบบ จากการทดสอบประเมินผลระบบการวัดที่ออกแบบเมื่อวันที่ 16 พฤษภาคม พ.ศ. 2565 พบว่า ค่าทางสภาพแวดล้อมเฉลี่ยตลอดวัน 09:00 – 16:00 น. มีดังนี้ ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์  $598.10 \text{ W/m}^2$  ความเข้มแสง  $69,068.97 \text{ Lux}$  อุณหภูมิ  $38.05 \text{ }^{\circ}\text{C}$  ความชื้นสัมพัทธ์  $41.43 \text{ \%RH}$  และความเร็วลม  $0.09 \text{ m/s}$  สอดคล้องกับรายงานอากาศสถานีอากาศเกษตร (สภย.) จังหวัดปทุมธานี ดังนี้ เช้าท้องฟ้ามีเมฆมาก กลางวันมีเมฆเต็มท้องฟ้า บ่ายมีเมฆเป็นส่วนใหญ่ เย็น-ค่ำ มีเมฆมาก มีฝนเล็กน้อย [18] ค่าพารามิเตอร์ที่วัดและคำนวณได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ทั้ง 2 แผง มีดังนี้  $29.06 \text{ V}$   $3.53 \text{ A}$   $102.35 \text{ W}$   $49.73 \text{ }^{\circ}\text{C}$   $12.02 \text{ V}$   $2.14 \text{ A}$   $25.79 \text{ W}$  และ  $48.30 \text{ }^{\circ}\text{C}$  ตามลำดับ จากค่าความเข้มรังสีอาทิตย์เฉลี่ย  $598.10 \text{ W/m}^2$  ซึ่งต่ำกว่าค่ามาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบที่  $1,000 \text{ W/m}^2$  ประมาณ 40 % ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าขาออกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ลดลงประมาณ 40 % และอุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์เฉลี่ยประมาณ  $50 \text{ }^{\circ}\text{C}$  ซึ่งสูงกว่าค่ามาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบที่  $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$  ส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ลดลง 0.5% ต่ออุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น  $1 \text{ }^{\circ}\text{C}$  หรือประมาณ 12.5 % จากรูปที่ 12 (ก) - (ข) ช่วงเวลา 13:00-13:30 น. เป็นช่วงเวลาที่เมฆมาก ส่งผลให้ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์และความเข้มแสงลดต่ำลง ซึ่งส่งผลกระทบต่อเป็นอย่างมากกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ดังแสดงในรูปที่ 11 (ก) – (ง) ซึ่งจะเห็นได้ว่า แรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ลดต่ำลง ส่วนค่าอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความเร็วลม จะสัมพันธ์อุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งส่งผลต่อแรงดันเปิดวงจรของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

ระบบที่ออกแบบสร้างสามารถวัดผลและแสดงผลได้มีค่าใกล้เคียงกับที่วัดโดยใช้มิเตอร์ ซึ่งมีค่าคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (MAE) ไม่เกินร้อยละ 3 ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้ สามารถวัดพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้อย่างถูกต้องแม่นยำ สามารถทำงานได้ตามวัตถุประสงค์ของการวิจัย ใช้งานได้ง่ายและมีประสิทธิภาพ ซึ่งช่วยอำนวยความสะดวกและลดเวลาในการบันทึกผลการศึกษาวิจัยได้ [19] ทั้งในด้านความสามารถในการศึกษาสมรรถนะของระบบผลิตได้ 2 ระบบพร้อมกัน และการวัดผลแสดงผลที่ครอบคลุมปรากฏการณ์สภาพแวดล้อมขณะทำการทดสอบ สามารถรีโมทระยะไกลได้โดยไม่ต้องอยู่หน้างาน แสดงผลได้ทั้งคอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊ก และสมาร์ทโฟน เป็นการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งเชื่อมต่อสื่อสารระหว่างเซนเซอร์ต่างๆ เข้ากับระบบอินเทอร์เน็ตเพื่ออำนวยความสะดวก [20] ในการวัดและแสดงผลงานวิจัยด้านการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

## เอกสารอ้างอิง

- [1] B. Aboagye, S. Gyamfi, E. A. Ofosu and S. Djordjevic, “Investigation into the impacts of design, installation, operation and maintenance issues on performance and degradation of installed solar photovoltaic (PV) systems,” *Energy for Sustainable Development*, Vol. 66, 2022, pp. 165-176.
- [2] V. Arenandan, J. K. Wong, A. N. Ahmed and M. F. Chow, “Efficiency enhancement in energy production of photovoltaic modules through green roof installation under tropical climates,” *Ain Shams Engineering Journal*, Vol. 13, No. 5, 2022, 101741.
- [3] ธนกร น้ำหอมจันทร์, “การศึกษาเปรียบเทียบสมรรถนะของอาร์เรย์โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ จากรูปแบบการเชื่อมต่อของอาร์เรย์ภายใต้การบังเงาบางส่วน โดยใช้เทคนิคการเลื่อนแถวของเมจิกสแควร์,” *วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเชีย ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*, ปีที่ 15, ฉบับที่ 3, 2564, หน้า 84-104.
- [4] N. Watjanatepin, “Application of LabVIEW and Compact Data Acquisition to Study the Behavior of the Photovoltaic Stand-Alone Energy System,” *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, Vol. 9, No. 32, 2015, pp. 59-65.
- [5] ธนกร น้ำหอมจันทร์, “การพัฒนาระบบการวัดระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อการศึกษาวิจัย,” *วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเชีย ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*, ปีที่ 15, ฉบับที่ 3, 2564, หน้า 223-242.
- [6] K. G. Srinivasan, K.Vimaladevi and S. Chakravarthi, “Solar Energy Monitoring System by IOT,” *International Journal of Advanced Networking & Applications (IJANA)*, Special Issue, 2019, pp. 46-51.
- [7] A. Oukennou, A. Berrar, I. Belbhar and N. E. Hamri, “Low Cost IoT System for Solar Panel Power Monitoring,” *Colloque International sur les Objets et Systèmes Connectés COC'2019*, Casablanca, 2019, hal-02298769.
- [8] T. Sutikno, H. S. Purnama, A. Pamungkas, A. Fadlil, I. M. Alsofyani and M. H. Jopri, “Internet of things-based photovoltaics parameter monitoring system using NodeMCU ESP8266,” *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, Vol. 11, No. 6, 2021, pp. 5578-5587.
- [9] สิริวิช ทัดสวน และ ประสิทธิ์ สุขเสริม, “การวัดและควบคุมค่า pH ของน้ำด้วยอินเทอร์เนตของสรรพสิ่ง,” *วารสารวิชาการปทุมวัน* ปีที่ 10, ฉบับที่ 28, 2563, หน้า 60-78.
- [10] Ashwak, ESP32 vs ESP8266 – Which One To Choose? [Online], Available: <https://www.electronicshub.org/esp32-vs-esp8266/> [June 14, 2022].
- [11] ESP32-WROOM-32 Datasheet V3.3 [Online], Available: [https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32\\_datasheet\\_en.pdf](https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32_datasheet_en.pdf) [June 15, 2022].
- [12] Solar Land SLP250-20 (250W) Solar Panel [Online], Available: <http://www.solarDesignTool.com/components/module-panel-solar/Solar-Land/2127/SLP250-20/specification-data-sheet.html> [June 15, 2022].

- [13] Current Sensor Module ACS712 - 20A [Online], Available: <https://5.imimg.com/data5/ZI/SN/MX/SELLER-1833510/current-sensor-module-ac712-20a.pdf> [June 15, 2022].
- [14] PT100 Resistance Table Technical Data Sheet TD-TV/PT1A [Online], Available: [http://www.manoraz.com/\\_Uploads/dbsAttachedFiles/PT-100\\_Table.pdf](http://www.manoraz.com/_Uploads/dbsAttachedFiles/PT-100_Table.pdf) [June 15, 2022].
- [15] MQTT (MQ TELEMETRY TRANSPORT) [Online], Available: <https://netpie.gitbooks.io/doc/content/second-chapter.html> [June 15, 2022].
- [16] Arduino IDE [Online], Available: <https://www.arduino.cc/en/software> [June 16, 2022].
- [17] Dashboard [Online], Available: <https://docs.netpie.io/freeboard.html> [June 16, 2022].
- [18] กรมอุตุนิยมวิทยา รายงานอากาศข้อมูลย้อนหลัง สถิติอากาศปทุมธานี สกษ. 10-16 พฤษภาคม พ.ศ. 2565 [Online], Available: <https://www.tmd.go.th/index.php> [May 17, 2022].
- [19] กันตภณ มะหาหมัด, ศรีวรรณ คำตรี และ สุวลี ชูวณิชย์, “การประยุกต์ใช้ระบบสมาร์ทฟาร์มสำหรับการผลิตเห็ดแครง,” วารสารวิชาการปทุมวัน ปีที่ 12, ฉบับที่ 33, 2565, หน้า 56-74.
- [20] ประภาพร กุลลีรัตน์ชัย, “INTERNET OF THINGS: เทคโนโลยีปัจจุบันที่ส่งแนวโน้มกับอนาคต,” วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, ปีที่ 10, ฉบับที่ 1, 2559, หน้า 29-36.