

การพัฒนาระบบการวัดระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อการศึกษาวิจัย

Development of Solar Power Generation Monitoring Systems for Research Studies

ธนากร น้ำหอมจันทร์¹

Thanakorn Namhormchan¹

¹คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย

¹School of Engineering, Eastern Asia University

Received: July 31, 2021

Revised: November 21, 2021

Accepted: November 29, 2021

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการพัฒนาระบบการวัดระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อการศึกษาวิจัย ออกแบบโดยใช้ LabVIEW ร่วมกับระบบการรวบรวมข้อมูล (DAQ) รุ่นประหยัด NI USB-6008 จำนวน 2 เครื่อง เครื่องที่ 1 ใช้สำหรับวัดสัญญาณค่าทางไฟฟ้า ได้แก่ แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ไหลของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ จำนวน 2 ระบบ และอุณหภูมิโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ และเครื่องที่ 2 ใช้สำหรับวัดสัญญาณค่าสภาพแวดล้อม ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ความเข้มแสง ความเร็วลม และความเข้มรังสีอาทิตย์ บล็อกไดอะแกรมออกแบบให้โปรแกรมทำงานวนซ้ำ (while loop) ดำเนินการทางคณิตศาสตร์กับสัญญาณที่รับเข้ามาผ่าน DAQ ตามค่าแรงดันขาออกของอุปกรณ์วัดสัญญาณแต่ละชนิด และแสดงผลบนพรอนท์พาเนลอีกทั้งสามารถบันทึกค่าต่าง ๆ ได้ตามเวลาที่กำหนด ผลการทดสอบประเมินผล พบว่า ระบบวัดที่นำเสนอมีความคลาดเคลื่อนตลอดวันไม่เกินร้อยละ 3 ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการศึกษาวิจัยเปรียบเทียบสมรรถนะการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ได้อย่างเหมาะสมต่อไปในอนาคต

คำสำคัญ: ระบบการวัด ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์

Abstract

This paper presents the development of a solar power system measurement system for research studies. The system using LabVIEW with two DAQ NI USB-6008 economical models; 1) for load voltage and current signal of the two solar power generation systems and the temperature of the PV modules and 2) for the environmental signal, i.e., temperature, relative humidity, light intensity, wind speed, and solar radiation intensity. The block diagram for a program operation is designed in a while loop and performs mathematical functions on the signal received through the DAQ based on the output voltage of each measuring device and displayed on the front panel and can save various values at the specified time. The evaluation test results revealed that the proposed measurement system has an all-day error of not more than 3%, which can be used in a research study to appropriately compare the solar power generation performance system in the future.

Keywords: monitoring systems, solar power generation systems, photovoltaic module



บทนำ

ปัจจุบันระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ได้รับความนิยมในการศึกษาวิจัยอย่างต่อเนื่อง ตัวอย่างเช่น การวิจัยด้านสมรรถนะของเซลล์แสงอาทิตย์ Singh and Ravindra (2012) นำเสนอการวิเคราะห์สมรรถนะของเซลล์แสงอาทิตย์ที่แปรผันตามอุณหภูมิ การวิจัยด้านอุปกรณ์ควบคุมการอัดประจุ LokeshReddy, Kumar, Chandra, Babu and Rajasekar (2017) นำเสนอการศึกษาเปรียบเทียบเทคนิคการควบคุมการอัดประจุแบบอนุกรม ขนาน และผสมระหว่างอนุกรมและขนานของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ การวิจัยด้านการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด Motahhir, Hammoui and Ghzizal (2019) นำเสนอผลการศึกษาอัลกอริธึมการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ได้รับคามนิยมในการนำไปใช้และบอร์ดสมองกลฝังตัวราคาประหยัดที่เหมาะสมสำหรับแต่ละอัลกอริธึม การวิจัยด้านอินเวอร์เตอร์ Fortes, Buzo and de Oliveira (2020) นำเสนอผลการประเมินความผิดพลาดจากฮาร์โมนิกส์ในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าโดยพิจารณาจากองค์ประกอบกระแสตรงที่ฉีดเข้าระบบจากอินเวอร์เตอร์ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ รวมถึงการวิจัยด้านผลกระทบจากการบังเงาบางส่วน และการเพิ่มกำลังผลิตของอาร์เรย์

โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ เช่น Namhormchan (2015) นำเสนอผลการศึกษาเปรียบเทียบการเพิ่มกำลังผลิตของ PV Array 9X9 ภายใต้เงื่อนไขการบังเงาบางส่วน 4 รูปแบบ โดยเปรียบเทียบระหว่างการจัดวางแบบคงที่ (Fixed) และแบบ ซู โด กุ (Su Do Ku) Namhormchan (2021) นำเสนอผลการศึกษาเปรียบเทียบการเพิ่มกำลังผลิตของ PV Array 5X5 ภายใต้เงื่อนไขการบังเงาบางส่วน 4 รูปแบบ โดยใช้เทคนิคการเลื่อนแถวของเมจิกสแควร์ (Magic Square) Venkateswari and Rajasekar (2020) นำเสนอผลการเพิ่มกำลังผลิตของ PV Array 9X9 ภายใต้เงื่อนไขการบังเงาบางส่วน 4 รูปแบบ โดยใช้เทคนิค โล ชู (Lo Shu) เปรียบเทียบกับแบบ TCT และ Su Do Ku และ Yadav, Kumar and D (2020) นำเสนอการศึกษาการลดกำลังสูญเสียจากการบังเงาบางส่วนของ PV Array 6X4 โดยใช้เทคนิคการจัดวางแผงแบบ Odd Even เป็นต้น

ส่วนประกอบที่สำคัญของการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ คือ ระบบวัดผล แสดงผล และบันทึกผล ซึ่งเป็นระบบที่จะช่วยให้ผู้วิจัยค้นพบผลลัพธ์ปรากฏการณ์ หรือพฤติกรรมระหว่างทำการศึกษาวิจัยได้ โดยระบบดังกล่าวนี้จะต้องสามารถวัดผล แสดงผล และบันทึกผลครอบคลุมค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่จะมีผลต่อพฤติกรรมของ

ระบบที่สนใจในการศึกษาวิจัยได้ โดยมีการวิจัยที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

Watjanatepin (2015) ได้นำเสนอระบบ Data-Acquisition--DAQ สำหรับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระด้วย LabVIEW เพื่อศึกษาพฤติกรรมของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ขนาด 450 วัตต์ จำนวน 1 ระบบ โดยวัดค่าทางไฟฟ้า ได้แก่ แรงดันและกระแสไฟฟ้ากระแสตรงที่ขาออกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และที่ขั้วแบตเตอรี่ แรงดันและกระแสไฟฟ้ากระแสสลับที่ขาออกของอินเวอร์เตอร์ และวัดค่าทางสภาพแวดล้อม ได้แก่ ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ โดยใช้ไพรานอมิเตอร์ ซึ่งใช้ DAQ NI 9229 และ NI 9215 สำหรับวัดค่าทางไฟฟ้ากระแสตรง และ DAQ NI 9225 และ NI 9203 สำหรับวัดค่าทางไฟฟ้ากระแสสลับและสภาพแวดล้อม โดยระบบที่นำเสนอสามารถวัดและแสดงผลในเวลาจริง (real time) และบันทึกผลได้ตลอดช่วงเวลาที่ทำการศึกษา

Ahmed, Kassas and Ahmed (2015) ได้นำเสนอระบบประเมินคุณลักษณะและพารามิเตอร์ออนไลน์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระโดยใช้ LabVIEW โดยทำการทดสอบกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ขนาด 150 วัตต์ จำนวน 1 แผง วัดค่าทางไฟฟ้า ได้แก่ แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่โหลด วัดค่าทางสภาพแวดล้อม ได้แก่ อุณหภูมิแผง อุณหภูมิแวดล้อม ความชื้น และความเร็วลม โดยใช้เครื่องมือวัดการระบายอากาศมัลติฟังก์ชัน VelociCal และวัดค่าความเข้มรังสีอาทิตย์โดยใช้ไพรานอมิเตอร์ ซึ่งใช้ DAQ เพื่อส่งค่าต่าง ๆ เข้าสู่คอมพิวเตอร์เพื่อประมวลผลบน LabVIEW โดยระบบที่นำเสนอสามารถวัดและแสดงผลในเวลาจริง (real time) และพล็อตกราฟ I-V และ P-V ได้อีกด้วย

Chinomi, Leelajindakrairerk, Boontaklang and Chompoo-Inwai (2017) นำเสนอระบบวัดผล แสดงผลและบันทึกผลอัจฉริยะสำหรับระบบไมโครกริดโดยใช้ LabVIEW DAQ USB 6212 ทำการวัดแรงดันและกระแสไฟฟ้าทั้งด้านกระแสตรงและกระแสสลับของระบบไมโครกริด ซึ่งประกอบไปด้วยระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ และพลังงานลม ระบบเก็บสะสมพลังงาน และโหลด วัดค่าทางสภาพแวดล้อม ได้แก่ อุณหภูมิแวดล้อม ความชื้นสัมพัทธ์ ความเร็วลม ทิศทางลม และความเข้มรังสีอาทิตย์ โดยระบบที่นำเสนอสามารถวัดและแสดงผลในเวลาจริงของ

ระบบไมโครกริด และสามารถแสดงรูปคลื่นของสัญญาณขาเข้า VI phase power phase 3 phase power และ harmonics ได้

Isdawimah, Ismujianto, Oktariza, Frederik and Loc (2019) นำเสนอการตรวจสอบพารามิเตอร์ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ภายใต้เงื่อนไขความเข้มรังสีอาทิตย์สูงสุด โดยทำการทดสอบกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิดโมโนคริสตัลไลน์ และโพลีคริสตัลไลน์ ขนาด 50 วัตต์ ชนิดละ 1 แผง วัดค่าทางไฟฟ้า ได้แก่ แรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 2 ชนิดและแบตเตอรี่ กระแสของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 2 ชนิด แบตเตอรี่ โหลด วัดค่าทางสภาพแวดล้อม ได้แก่ ความเข้มแสงสว่าง ซึ่งใช้ DAQ แบบประหยัด NI USB 6008 โดยระบบที่นำเสนอสามารถวัดและแสดงผลในเวลาจริงตามวัตถุประสงค์ได้

วัตถุประสงค์การวิจัย

เพื่อพัฒนาระบบการวัดระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อการศึกษาวิจัย ที่สามารถวัดผล แสดงผล และบันทึกทีละผลค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ได้ 2 ระบบพร้อมกัน รวมทั้งค่าทางสภาพแวดล้อมที่สัมพันธ์กับการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ได้แก่ ความเข้มรังสีอาทิตย์ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ความเร็วลม ความเข้มแสง และอุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้ โดยใช้ DAQ แบบประหยัดร่วมกับ LabVIEW

เซลล์แสงอาทิตย์

อาร์เรย์โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ (PV Array) เป็นส่วนประกอบที่สำคัญของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ได้มาจากการเชื่อมต่อกันของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ (PV Module) ในรูปแบบต่าง ๆ ซึ่งโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ ประกอบขึ้นจากเซลล์แสงอาทิตย์ (PV Cell) หลาย ๆ เซลล์ ต่อร่วมกันแบบอนุกรม แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์เขียนแทนด้วยแหล่งกำเนิดกระแสต่อขนานกับไดโอด วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ แสดงดังภาพ 1 (Namhormchan, 2018)

คุณลักษณะแรงดันและกระแสเอาต์พุตของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ความเข้มแสงอาทิตย์ (Solar Irradiance; G) เขียนได้ดังสมการที่ (1)

$$I_{PV} = I_{Ph} - I_o \left[\exp \left(\frac{V_{PV} + R_s I_{PV}}{A} \right) - 1 \right] - \left[\frac{V_{PV} + I_{PV} R_s}{R_{sh}} \right] \quad (1)$$

โดยที่ I_{PV} คือ กระแสของโมดูล I_{Ph} คือ กระแสโฟโตอิเล็กทริก I_o คือ กระแสอิ่มตัว V_{PV} คือ แรงดันเอาต์พุตของ PV และ $A = nkT/q$ โดยที่ n คือ แฟคเตอร์ไดโอดในอุดมคติ (Diode Ideality Factor) k คือ ค่าคงที่ของโบลทซ์มันน์ (Boltzmann) T คือ อุณหภูมิของโมดูล หน่วยเป็นเคลวิน q คือ ประจุไฟฟ้า (1.602×10^{-19} C) R_s และ R_{sh} คือ ค่าความต้านทานอนุกรมและขนาน ตามลำดับ

กระแสโฟโตอิเล็กทริกหรือกระแสที่เกิดขึ้นจากแสงอาทิตย์หาได้จากฟังก์ชันกระแสลัดวงจร ดังสมการที่ (2)

$$I_{PV} = I_{SCO} \left(\frac{G}{G_o} \right) (1 + \alpha_1 (T - T_o)) \frac{R_s + R_{sh}}{R_{sh}} \quad (2)$$

โดยที่ I_{SCO} คือ กระแสลัดวงจรของโมดูลที่ความเข้มแสงอาทิตย์มาตรฐาน G_o ($1,000 \text{ W/m}^2$) และอุณหภูมิมาตรฐาน T_o (25°C) และ α_1 เป็นค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของกระแสลัดวงจรของโมดูล

กำลังการผลิตไฟฟ้าจากโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ขึ้นกับปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมหลายประการด้วยกัน เช่น ความเข้มรังสีที่ตกกระทบบนพื้นที่ อุณหภูมิบนโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ และสิ่งแวดล้อม โดยพลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเท่ากับพลังงานจากโฟตอนที่ตกกระทบบนพื้นที่หนึ่งหน่วยบนโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ โดยโฟตอนฟลักซ์ (Photon Flux: Φ_{ph}) มีค่าตามสมการ (3)

$$\Phi_{ph} = N_{ph} E = \frac{N_{ph} hc}{\lambda} \quad (3)$$

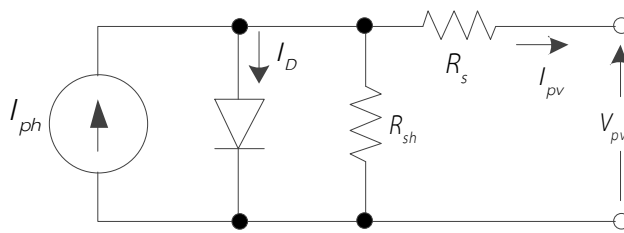
โดยที่ N_{ph} คือ จำนวนโฟตอนทั้งหมดที่ตกกระทบบนพื้นที่หนึ่งหน่วย E คือ พลังงานของโฟตอน h คือ ค่าคงที่ของพลังค์ (Planck's constant) c คือ ความเร็วของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในสุญญากาศ และ λ คือ ความยาวคลื่นของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

แรงดันไฟฟ้าขาออกจากโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์สัมพันธ์กับอุณหภูมิโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ ตามสมการ (4)

$$V_{oc} = \frac{nkT}{q} \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_o} \right) \quad (4)$$

เมื่อ V_{oc} คือ แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด (open-circuit voltage) (Phonghirun, Sirinilakul, Phadungkit, Chorumluk & Boonlom, 2017).

การสูญเสียกำลังเอาต์พุตของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์เกิดจาก 2 ปัจจัยหลัก คือ ทางด้านแสง (optical) และทางด้านไฟฟ้า (electrical) ปัจจัยทางด้านแสงที่สำคัญ คือ การบังเงา ถ้าแต่ละเซลล์ได้รับพลังงานแสงในปริมาณที่ไม่เท่ากัน เซลล์ที่อยู่ในแสงอาทิตย์จะสามารถทำงานได้ตามปกติ และเซลล์ที่ถูกบังเงาจะกลายเป็นโหลดหรือตัวรับกระแสจากเซลล์อื่น ทำให้เกิดการสูญเสียกำลังไฟฟ้าขึ้น การบังเงาอาจเกิดได้จากก้อนเมฆ เครื่องบิน หรืออาคารใกล้เคียง ซึ่งการบังเงานี้จะเกิดขึ้นเป็นบางช่วงเวลาเท่านั้น



ภาพ 1 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์

Note. Adapted From “Comparative Study of Enhanced Power Generation From PV Array Under Partial Shading Conditions”, by T. Namhormchan, 2015, *EAU Heritage Journal Science and Technology*, 9(3), pp. 25-34. Copyright 2015 by Eastern Asia University

LabVIEW และ DAQ

LabVIEW เป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สร้างเพื่อนำมาใช้ในการวัดและเครื่องมือวัดสำหรับงานทางวิศวกรรม มีชื่อย่อมาจาก Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench หมายถึง โปรแกรมที่สร้างเครื่องมือวัดเสมือนจริงในห้องปฏิบัติการทางวิศวกรรม จัดเป็นโปรแกรมประเภท GUI (Graphic User Interface) ภาษาที่ใช้ในโปรแกรมนี้นี้จะเรียกว่าเป็น ภาษารูปภาพ หรือเรียกว่าภาษา G (Graphical Language) สามารถเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอก เช่น DAQ (Data Acquisition) พอร์ตอนุกรม (Serial Port) เพื่อใช้ติดต่อกับอุปกรณ์ที่ส่งผ่านข้อมูลแบบอนุกรมได้โดยง่าย รวมถึงความสามารถในการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้ด้วยฟังก์ชันการทำงาน และฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์อื่น ๆ มีส่วนประกอบที่สำคัญ ได้แก่ (1) Front Panel เปรียบเสมือนกับสิ่งที่ผู้ใช้จะได้เห็นและควบคุมการทำงาน โดยผู้ใช้สามารถสร้างรูปแบบขึ้นเองมีส่วนประกอบต่าง ๆ เช่น จอแสดงผลแบบออสซิลโลสโคป ปุ่มหมุน และ สวิตช์ เป็นต้น โดย LabVIEW จะแสดงผลและควบคุมการทำงานผ่านทางคอมพิวเตอร์ และ (2) Block Diagram คือ พื้นที่ส่วนเขียนโปรแกรม เปรียบเสมือนกับ Hardware ภายในเครื่องมือวัด โดย LabVIEW จะเขียนโปรแกรมโดยอาศัยภาษารูปภาพ

ระบบ DAQ (Data acquisition) เป็นการเก็บรวบรวมวิเคราะห์ข้อมูลจริงในงานวิจัยทดลองวิทยาศาสตร์ และทดสอบงานทางด้านวิศวกรรมผ่านคอมพิวเตอร์ โดยมีฮาร์ดแวร์พิเศษเพื่อตรวจจับสัญญาณทางกายภาพ เช่น

อุณหภูมิ ความดันอากาศ อัตราการไหล เป็นต้น แปลงเข้าสู่ระบบคอมพิวเตอร์ในลักษณะสัญญาณทางไฟฟ้า ผ่านซอฟต์แวร์ประยุกต์ที่พัฒนาตามคุณลักษณะของงานวิจัยทดลองนั้น ๆ ในลักษณะเวลาจริง (Chivapansri, 2007)

วิธีดำเนินการวิจัย

การออกแบบระบบการวัดระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อการศึกษาวิจัยในงานวิจัยนี้ แบ่งออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้

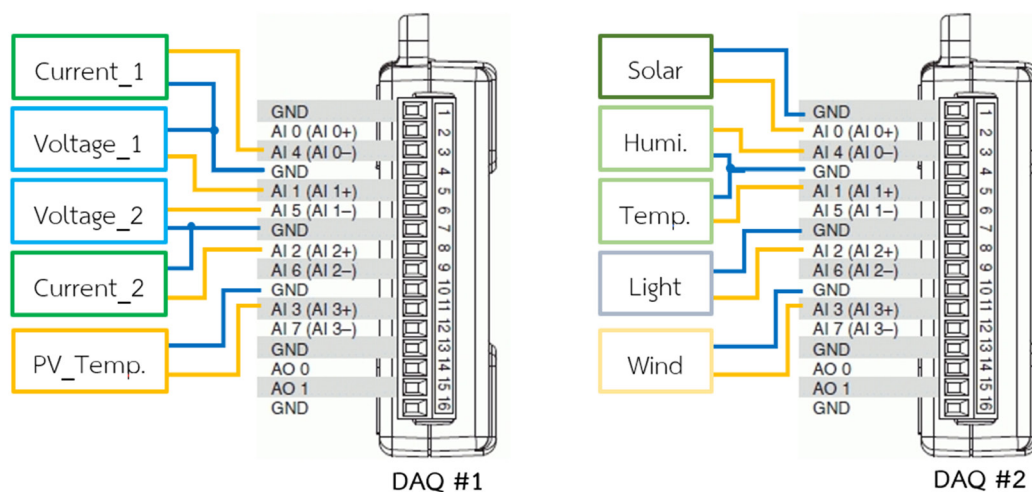
1. การออกแบบฮาร์ดแวร์ (Hardware)

ฮาร์ดแวร์เลือกใช้ DAQ รุ่นประหยัด NI USB-6008 โดยเลือกใช้จำนวน 2 เครื่อง สำหรับวัดแรงดันและกระแสไฟฟ้าโหลดสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ 2 ระบบ และอุณหภูมิโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์เครื่องหนึ่ง และอีกเครื่องหนึ่งสำหรับวัดค่าทางสภาพแวดล้อม ประกอบด้วย ความเข้มรังสีอาทิตย์ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ความเร็วลม และความเข้มแสง โดยมีไดอะแกรมการเชื่อมต่อระหว่าง DAQ และอุปกรณ์วัดสัญญาณต่าง ๆ ตามภาพ 2

อุปกรณ์วัดสัญญาณสำเร็จรูปที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ได้แก่ เซ็นเซอร์วัดกระแสไฟฟ้ากระแสตรง อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ ความเข้มแสง พลังงานแสงอาทิตย์ และความเร็วลม โดยมีแผนการวัดและพิกัดแรงดันขาออก แสดงดังตาราง 1

การวัดค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจะใช้วงจรการแบ่งแรงดัน (voltage division circuit) โดยออกแบบสำหรับโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์พิกัด 250 วัตต์ ซึ่งจะใช้สำหรับทดสอบการทำงานของระบบที่ออกแบบ พิกัดแรงดันขาเข้าที่ $1.25 \times V_{oc} = 1.25 \times 37.8 \approx 50$ โวลต์ พิกัดแรงดันขาออก 0–10 โวลต์ สอดคล้องกับพิกัดแรงดันขาเข้าของ DAQ และกำหนดให้กระแสไหลในวงจรไม่เกิน 1 มิลลิแอมป์ จะได้วงจรการวัดแรงดันตามภาพ 3

การวัดค่าอุณหภูมิโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์จะใช้ โพรบวัดอุณหภูมิ RTD Pt100 โดย Pt100 เป็นเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิที่อาศัยหลักการของความต้านทาน คือ เมื่ออุณหภูมิที่ 0 องศาเซลเซียส ค่าความต้านทานจะมีค่า 100 โอห์ม ถ้าอุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าความต้านทานก็จะเพิ่มขึ้นด้วย และถ้าอุณหภูมิลดลงค่าความต้านทานก็จะลดลงด้วย

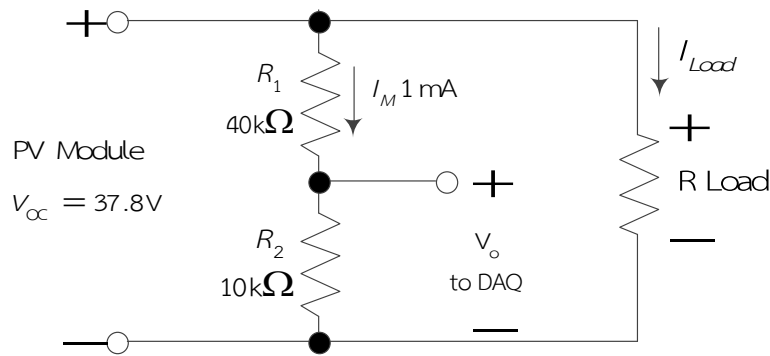


ภาพ 2 ไดอะแกรมการเชื่อมต่อระหว่าง DAQ และอุปกรณ์วัดสัญญาณต่างๆ

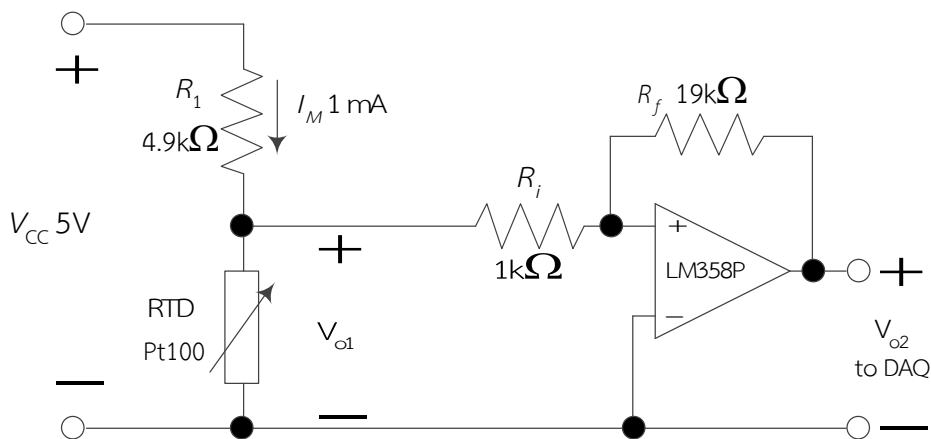
ตาราง 1

พิกัดของอุปกรณ์วัดสัญญาณสำเร็จรูปที่ใช้ในงานวิจัย

Sensor	Range	Output Voltage
Current Sensor	0~20A	2.5-4.5 V
Temp. Humi. Transmitter	T: 0~80 °C, RH: 0~100%	0-5 V
Ambient Light Sensor	0~200,000 lux	0-10 V
Total Solar Radiation Sensor	0~1,500 W/m ²	0-10 V
Wind Sensor	0~30 m/s	0-10 V



ภาพ 3 วงจรการวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง



ภาพ 4 วงจรการวัดอุณหภูมิโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์

ตาราง 2

พิกัดของวงจรวัดสัญญาณที่ออกแบบใช้ในงานวิจัย

Sensor	Range	Output Voltage
Voltage Divider, Ratio 5: 1	0~50V	0-10 V
PV Module Temp.	20~100 °C	2.16-2.74 V

การออกแบบวงจรวัดอุณหภูมิในช่วงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ 20–100 องศาเซลเซียส ค่าความต้านทานจะอยู่ในช่วง 107.79–138.5 โอห์ม เพื่อให้ DAQ สามารถอ่านค่าอุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้ จึงจะใช้ RTD Pt100 ต่อเป็นวงจรการแบ่งแรงดัน และทำการขยายสัญญาณ 20 เท่า โดยใช้วงจรขยายแบบไม่กลับเฟส (Non-Inverting Amp) เพื่อให้สอดคล้องกับแรงดันขาเข้าของ DAQ ดังนั้นจะได้แรงดันขาออกของวงจร ในช่วงการเปลี่ยนแปลงแรงดัน 2.16-2.74 โวลต์ จะได้วงจรการวัดอุณหภูมิโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ตามภาพ 4

วงจรวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและวงจรวัดอุณหภูมิโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่ออกแบบมีย่านการวัดและพิกัดแรงดันขาออก แสดงดังตาราง 2

2. การออกแบบบล็อกไดอะแกรม (block diagram)

เพื่อให้โปรแกรม LabVIEW ที่ติดตั้งบนคอมพิวเตอร์สามารถวัดและประมวลผลสัญญาณจากอุปกรณ์วัดสัญญาณต่าง ๆ กระทำการดำเนินการทางคณิตศาสตร์และแสดงผลบนพรอนท์พาแนลได้อย่างถูกต้อง จะต้องออกแบบบล็อกไดอะแกรมให้สอดคล้องกับสิ่งที่ต้องการจะวัด อัตราส่วนแรงดันต่อสิ่งที่ต้องการจะวัดและการแสดงผลบนหน้าจอ

โดยระบบวัดนี้จะออกแบบให้โปรแกรมสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่อง โดยใช้ While loop ซึ่งจะทำงานอย่างต่อเนื่องจนกว่าจะพบเงื่อนไขการหยุดที่ถูกต้อง บล็อกไดอะแกรม while loop บน LabVIEW เปรียบเทียบกับ Flow chart แสดงดังภาพ 5 การออกแบบบล็อกไดอะแกรมของ DAQ แต่ละเครื่อง ดังนี้

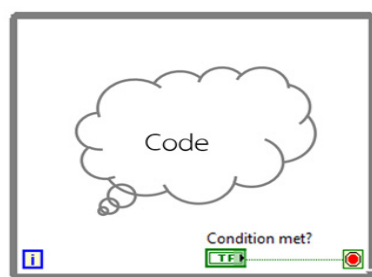
จากภาพ 2 DAQ เครื่องที่ 1 ใช้สำหรับวัดแรงดัน กระแส และคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าที่โหลดสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ 2 ระบบ และอุณหภูมิโมดูล เซลล์แสงอาทิตย์ จากตาราง 2 อัตราส่วนแรงดันของวงจรการวัดแรงดันไฟฟ้า 5: 1 และตาราง 1 แรงดันขาออกของเซ็นเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าที่ 2.5 โวลต์เมื่อมีกระแสไหลผ่าน 0 แอมป์และแรงดันขาออกเพิ่มขึ้น 0.1 โวลต์ต่อกระแสไหลผ่าน 1 แอมป์ บล็อกไดอะแกรมการวัดแรงดัน กระแส และคำนวณค่ากำลังไฟฟ้า ($P=VI$) ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ระบบที่ 1 โดยกำหนดให้แสดงผลแรงดัน กระแสและกำลังไฟฟ้าเป็นกราฟและตัวเลข แสดงดังภาพ 6 จากตาราง 2 แรงดันขาออกวงจรการวัดอุณหภูมิโมดูลในช่วง

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ 20–100 องศาเซลเซียส สำหรับค่าอุณหภูมิใด ๆ จะหาได้จากการประมาณค่าในช่วงเชิงเส้น (linear interpolation) ซึ่งกำหนดให้แสดงผลเป็นหน้าปัด และตัวเลขบล็อกไดอะแกรมแสดงได้ดังภาพ 7

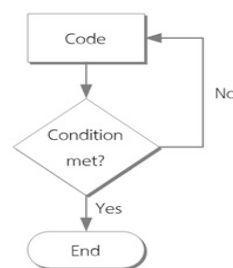
จากภาพ 2 DAQ เครื่องที่ 2 ใช้สำหรับวัดสำหรับวัดค่าทางสภาพแวดล้อม ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ความเข้มแสง ความเร็วลม และความเข้มรังสีอาทิตย์ และจากตาราง 1 ช่วงแรงดันขาออกของอุปกรณ์วัดสัญญาณแต่ละชนิด โดยกำหนดให้แสดงผลเป็นตัวเลขและสำหรับค่าความเข้มรังสีอาทิตย์จะมีการแสดงผลในหน้าปัดด้วย ซึ่งรับค่าจะอุปกรณ์วัดสัญญาณแล้วทำการคูณด้วยค่าคงที่ที่สอดคล้องกับพิกัดของสิ่งที่วัดและแรงดันขาออกบล็อกไดอะแกรมของ DAQ เครื่องที่ 2 แสดงดังภาพ 8

ระบบวัดนี้ออกแบบให้สามารถกำหนดช่วงเวลาการบันทึกผลได้ โดยบันทึกผลในเวลาจริง โดยใช้บล็อกไดอะแกรม Write to File ดังภาพ 9

ภาพรวมบล็อกไดอะแกรมของระบบวัดแสดงดังภาพ 10

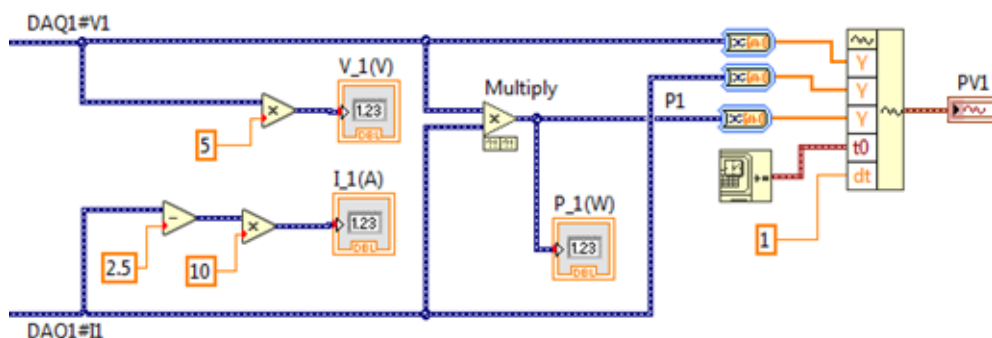


(a)

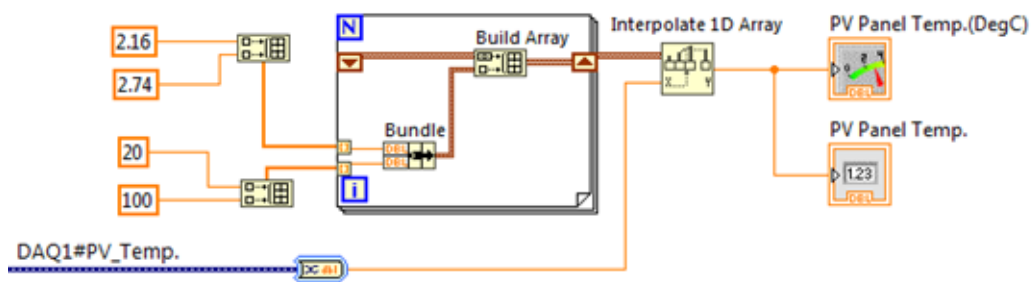


(b)

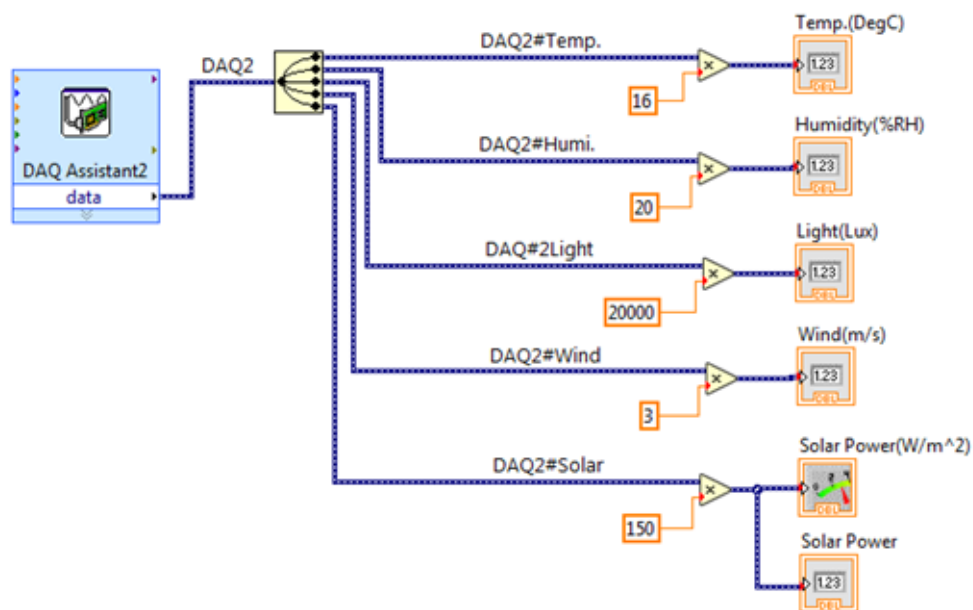
ภาพ 5 While Loop: (1) LabVIEW While Loop (2) Flowchart



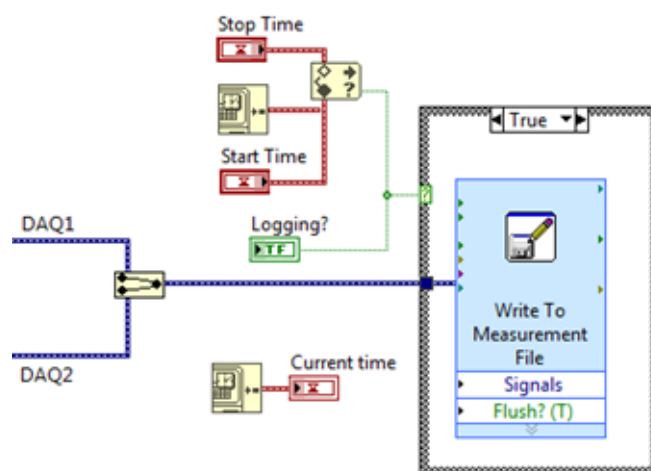
ภาพ 6 บล็อกไดอะแกรมการวัดแรงดัน กระแส และคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าของระบบที่ 1



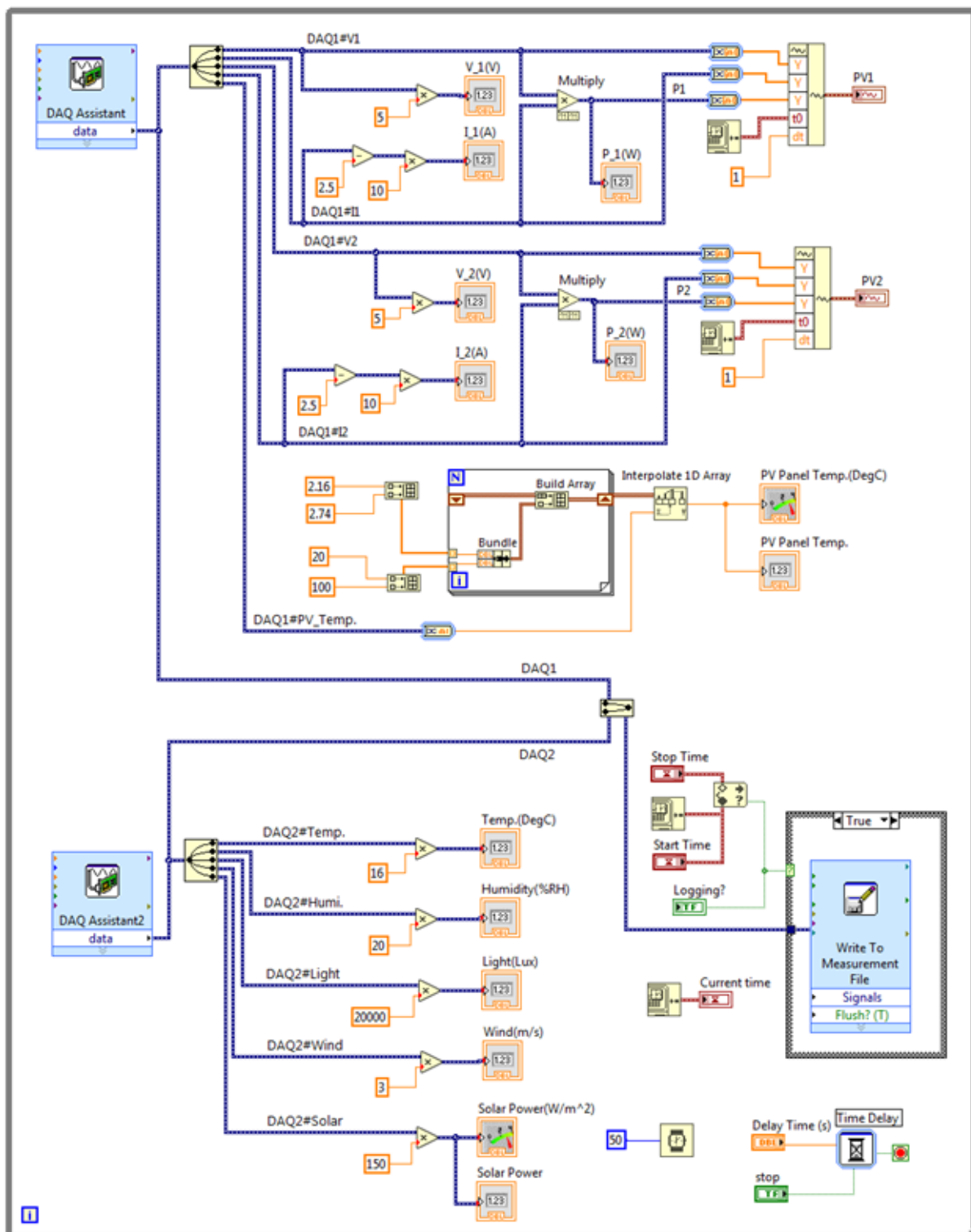
ภาพ 7 บล็อกไดอะแกรมการวัดอุณหภูมิโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์



ภาพ 8 บล็อกไดอะแกรมการวัดสภาพแวดล้อมของ DAQ เครื่องที่ 2



ภาพ 9 บล็อกไดอะแกรมการกำหนดระยะเวลาการบันทึกที่ผลจากอุปกรณ์วัดสัญญาณ



ภาพ 10 บล็อกไดอะแกรมของระบบการวัดระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อการศึกษาวิจัย

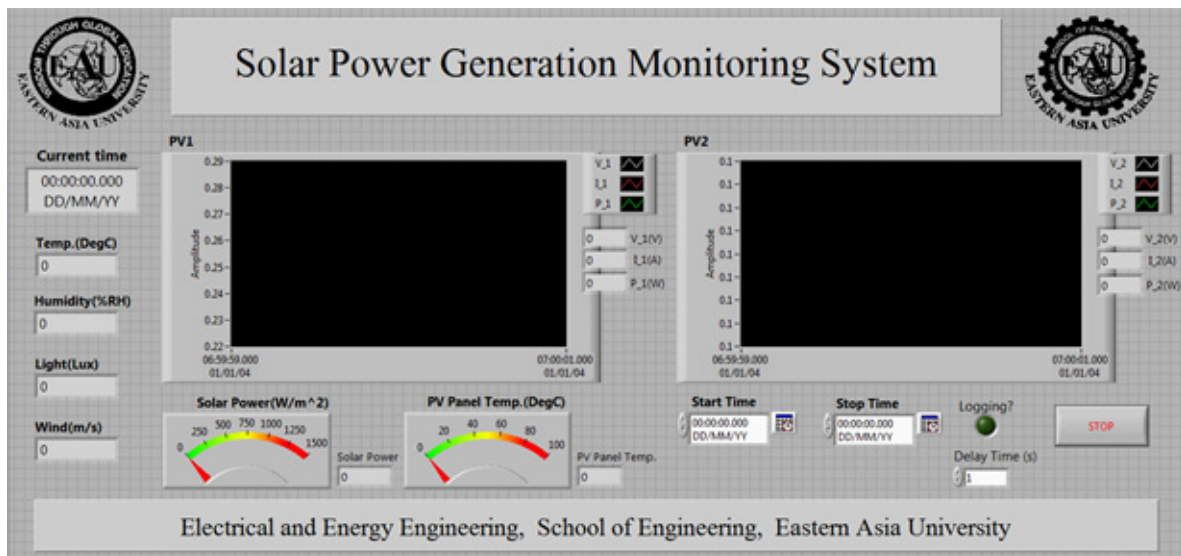
3. การออกแบบฟรอนท์พาแนล (front panel)

จากรูปแบบการแสดงผลของค่าต่าง ๆ ที่กำหนดไว้ในการออกแบบบล็อกไดอะแกรม ได้แก่ แรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ทั้ง 2 ระบบ แสดงผลเป็นกราฟและตัวเลข อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ความเข้มแสงและความเร็วลมแสดงผลเป็นตัวเลข อุณหภูมิโมดูลและความเข้มรังสีอาทิตย์แสดงผลบนหน้าปัดและตัวเลข รวมทั้งการแสดงผลเวลาจริง การกำหนดระยะเวลาการบันทึกผล จะได้ฟรอนท์พาแนลที่ออกแบบแสดงดังภาพ 11

ทำการทดสอบประเมินผลระบบการวัดระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อการศึกษาวิจัยที่ได้ออกแบบบนดาตาฟ้ำ อาคารชวน ชวนิชย์ (อาคาร 6 ชั้น) มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย จังหวัดปทุมธานี

การทดสอบประเมินผลระบบวัดโดยใช้โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ พิกัด 250 วัตต์ และ 100 วัตต์ แสดงดังภาพ 12 DAQ ทั้ง 2 เครื่องและอุปกรณ์การวัดสัญญาณที่ออกแบบสร้างแล้วเสร็จแสดงดัง ภาพ 13 และ 14 โดยทำการประเมินผลระบบวัดผล แสดงผลและบันทึกผลเปรียบเทียบกับ การวัดโดยใช้มิเตอร์เพื่อพิจารณาความคลาดเคลื่อนของระบบวัด ซึ่งมีเตอร์ที่ใช้มีคุณสมบัติแสดงดังตาราง 3 ทำการสุ่มวัดทุก ๆ 15 นาที เมื่อวันที่ 12 ธันวาคม พ.ศ. 2563 เวลา 09:00–16:00 น. ผลการทดสอบแสดงดังภาพ 15 ถึง 19

การทดสอบเก็บผลระบบวัดผล แสดงผลและบันทึกผลที่ออกแบบ โดยสุ่มบันทึกผลทุก ๆ 1 วินาที เมื่อวันที่ 14 ธันวาคม พ.ศ. 2563 เวลา 09:00–16:00 น. ผลการทดสอบแสดงดังภาพ 20 ถึง 24



ภาพ 11 ฟรอนท์พาแนลของระบบการวัดระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อการศึกษาวิจัย

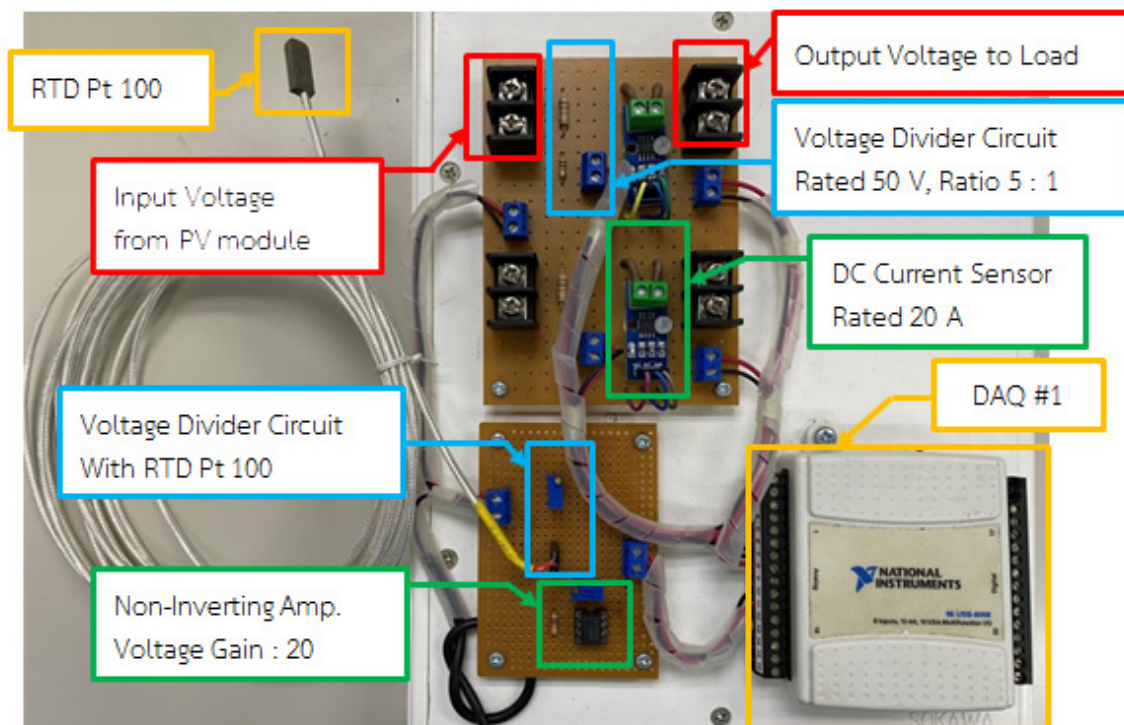
ตาราง 3

พิกัดของเครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดสอบประเมินผล

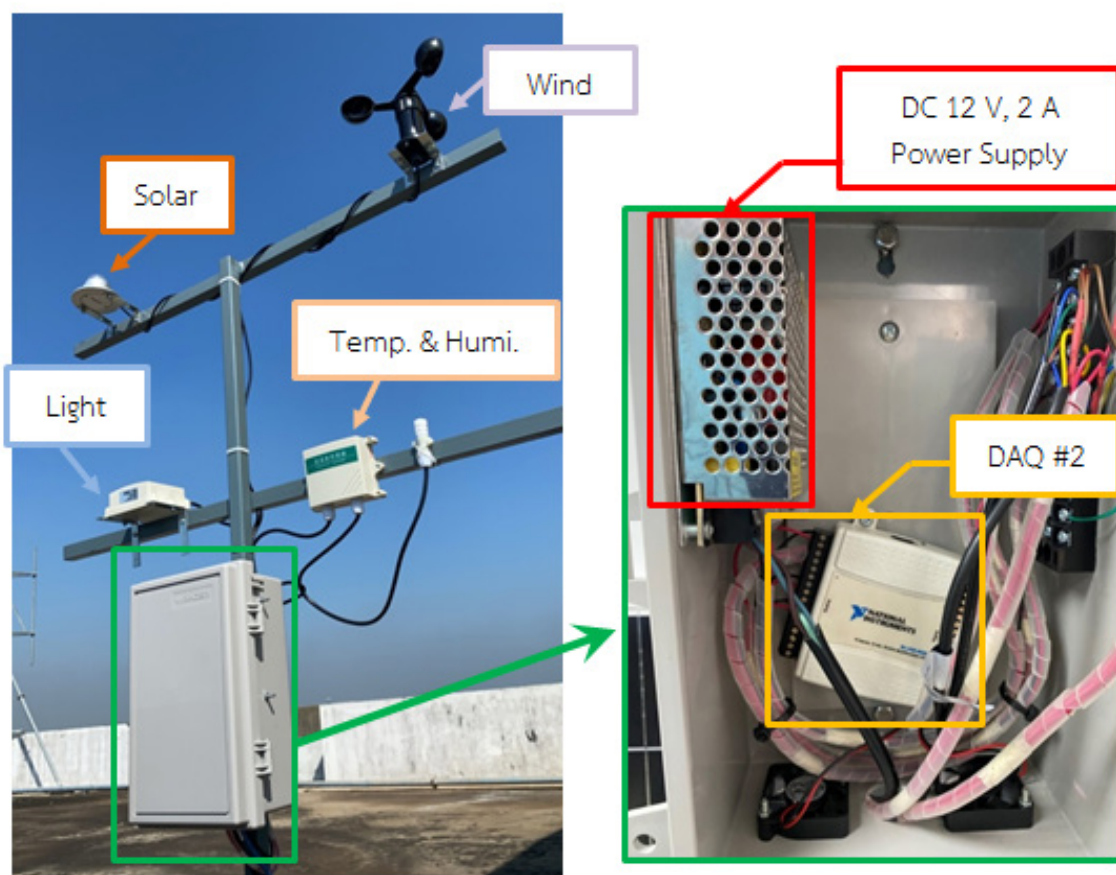
Type	Model	Range	Accuracy
Solar Power Meter	Lutron SPM-1116SD	0~2,000 W/m ²	±10 W/m ²
Anemometer and Air Flow	Lutron LM-9000	0.4~30.0 m/s 10~95% RH -100~1300 °C	±3% F.S. (≤20 m/s) ≤ ±4% RH (<70% RH) ±(1% rdg+1°C)
Light Meter	Lutron LX-11128SD	0~100,000 Lux	±(4%+2 dgt)
True RMS Multimeter	Fluke 115	0~600 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



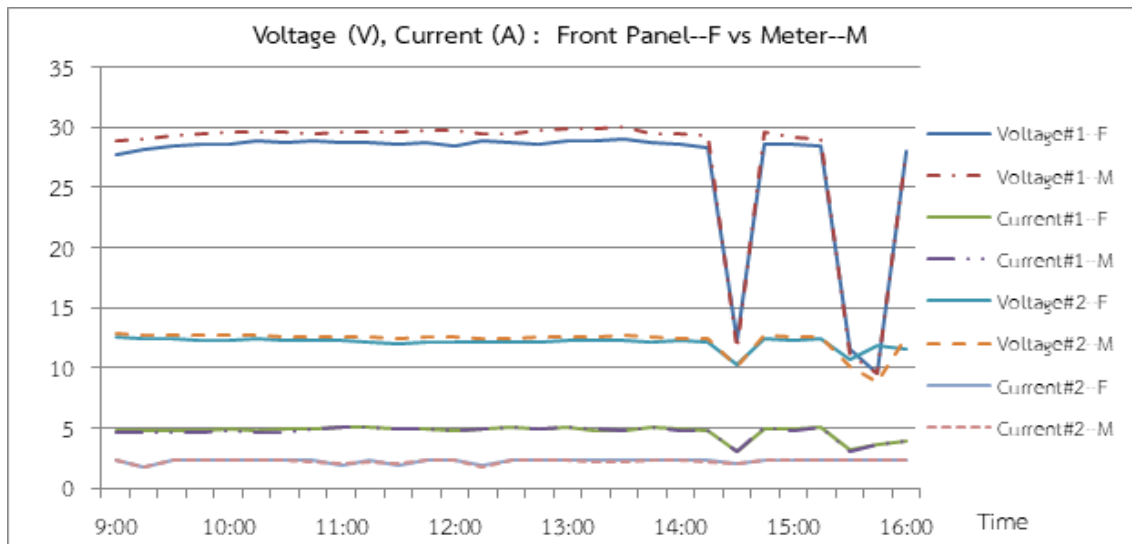
ภาพ 12 การทดสอบระบบการวัดระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อการศึกษาวิจัย



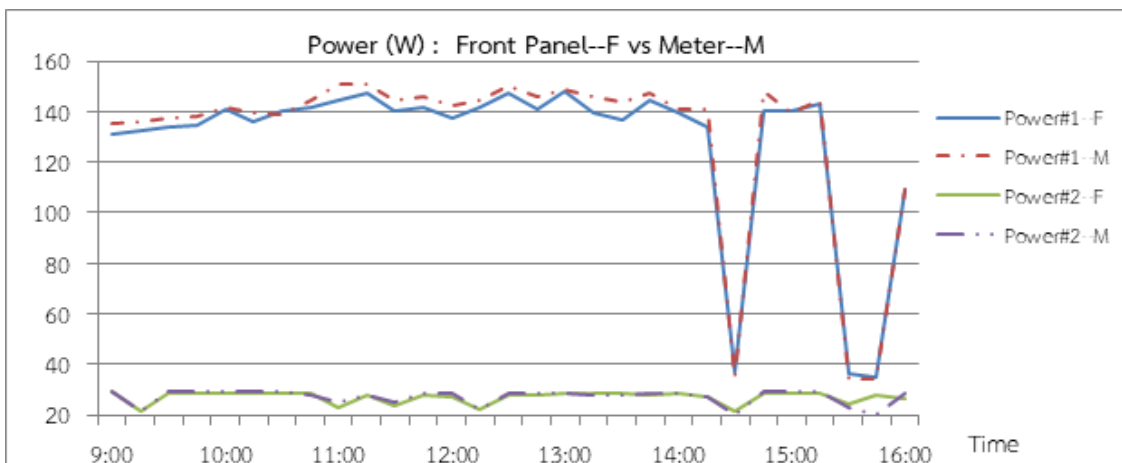
ภาพ 13 DAQ เครื่องที่ 1 และอุปกรณ์วัดสัญญาณ



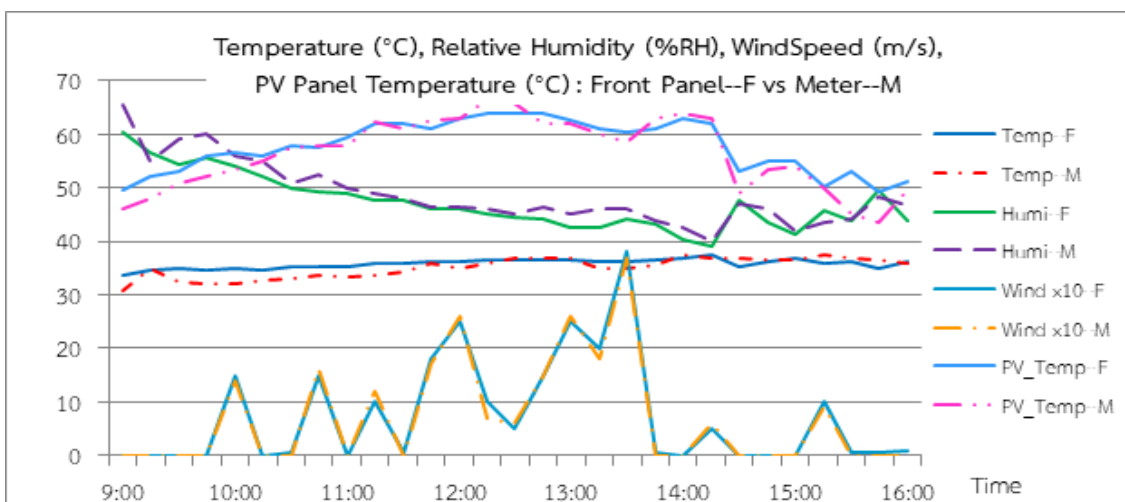
ภาพ 14 DAQ เครื่องที่ 2 และอุปกรณ์วัดสัญญาณ



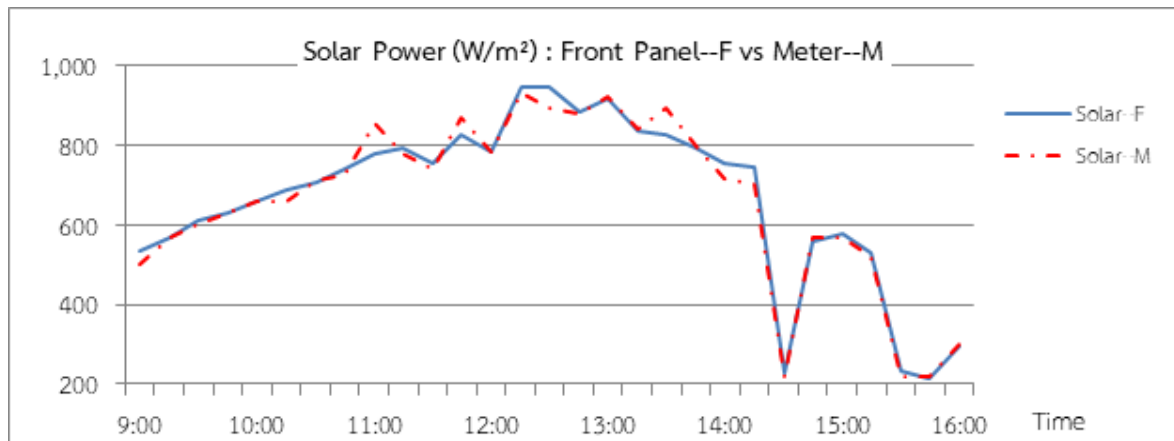
ภาพ 15 การทดสอบประเมินผลการวัดแรงดันและกระแสไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ทั้ง 2 ระบบ เปรียบเทียบระหว่างระบบวัดและมิเตอร์



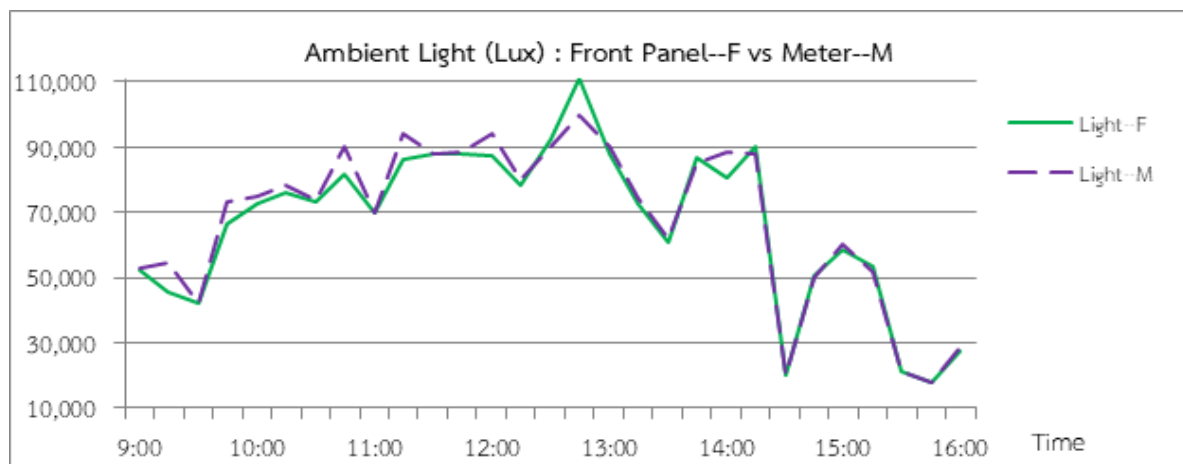
ภาพ 16 การทดสอบประเมินผลการคำนวณค่ากำลังไฟของระบบวัดเปรียบเทียบกับการวัดโดยใช้มิเตอร์



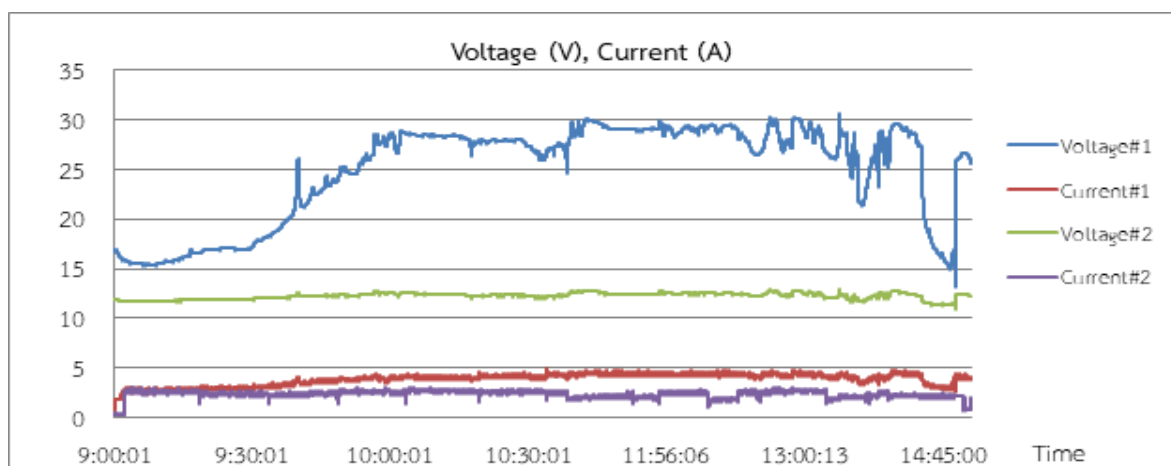
ภาพ 17 การทดสอบประเมินผลการวัดอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ความเร็วลม และอุณหภูมิโมดูลเปรียบเทียบระหว่างระบบวัดและมิเตอร์



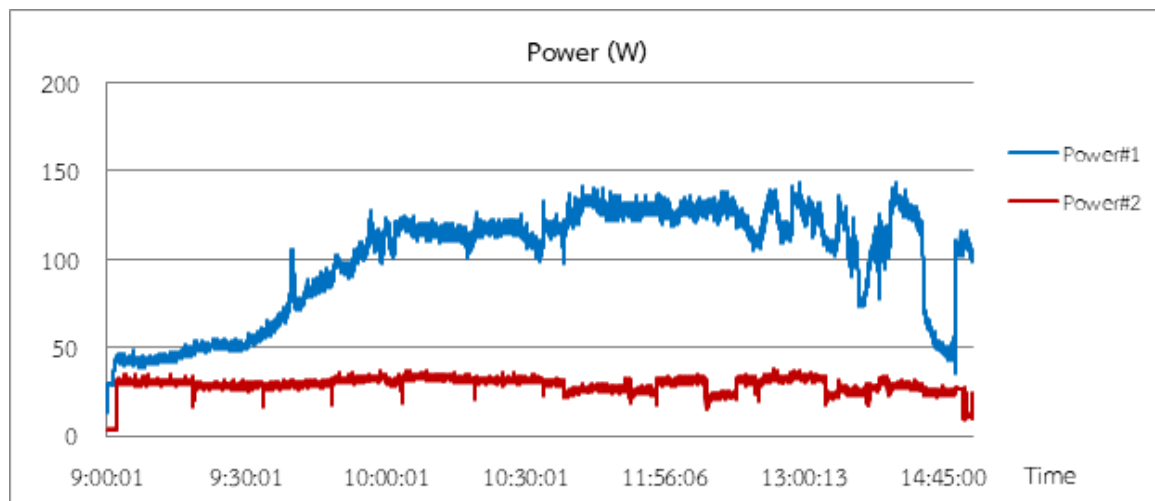
ภาพ 18 การทดสอบประเมินผลการวัดความเข้มรังสีอาทิตย์เปรียบเทียบระหว่างระบบวัดและมิเตอร์



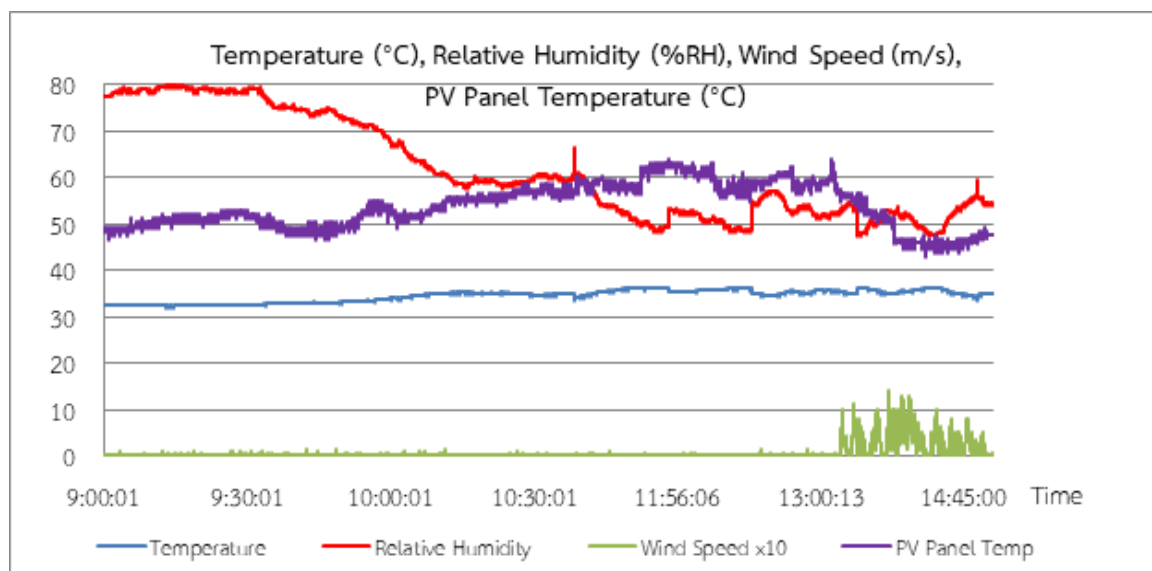
ภาพ 19 การทดสอบประเมินผลการวัดความเข้มแสงเปรียบเทียบระหว่างระบบวัดและมิเตอร์



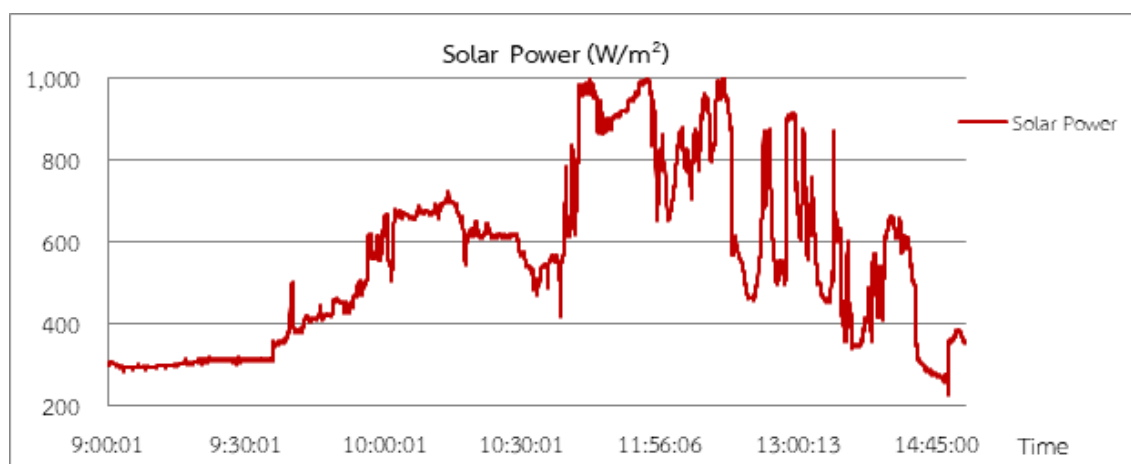
ภาพ 20 การทดสอบเก็บผลการวัดแรงดันและกระแสไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ทั้ง 2 ระบบ



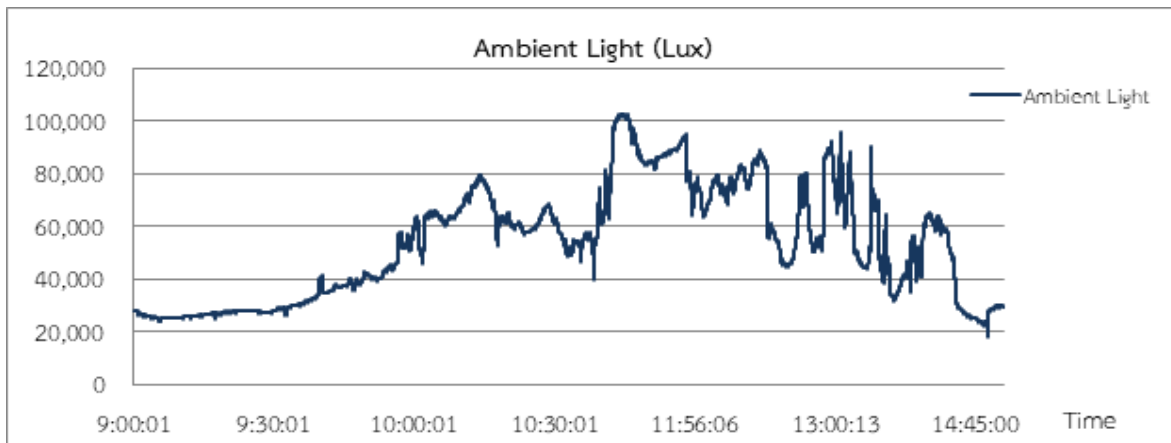
ภาพ 21 การทดสอบเก็บผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ทั้ง 2 ระบบ



ภาพ 22 การทดสอบเก็บผลการวัดอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ความเร็วลม และอุณหภูมิโมดูล



ภาพ 23 การทดสอบเก็บผลการวัดความเข้มรังสีอาทิตย์



ภาพ 24 การทดสอบเก็บผลการวัดความเข้มแสง

ตาราง 4

ค่าความคลาดเคลื่อนตลอดวันของระบบวัดที่ออกแบบเปรียบเทียบกับมิเตอร์

Parameter	% Error	Parameter	% Error
Voltage 1	2.26	Temp.	2.37
Current 1	0.65	Humi.	2.84
Power 1	1.62	Light	2.10
Voltage 2	0.99	Wind	0.58
Current 2	1.25	Solar	0.76
Power 2	0.23	PV_Temp.	2.81

ผลการวิจัย

ระบบการวัดระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อการศึกษาวิจัยที่ได้ออกแบบตามงานวิจัยนี้ ประกอบด้วย 3 ส่วนที่สำคัญ ได้แก่ (1) ฮาร์ดแวร์ประกอบด้วย DAQ รุ่นประหยัด NI USB-6008 จำนวน 2 เครื่อง เครื่องที่ 1 สำหรับ วัดแรงดันและกระแสไฟฟ้าไหลของระบบผลิตไฟฟ้า พลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งสามารถวัดได้ 2 ระบบพร้อมกัน โดยออกแบบสำหรับโมดูลพิกัด 250 วัตต์ และวัตต์อุณหภูมิ โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ เครื่องที่ 2 สำหรับวัดอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ความเข้มแสง ความเร็วลม และความชื้น รังสีอาทิตย์ ซึ่ง DAQ ทั้ง 2 เครื่องเชื่อมต่อกับอุปกรณ์วัด สัญญาณที่ออกแบบขึ้นและอุปกรณ์วัดสัญญาณสำเร็จรูปที่มีจำหน่ายตามท้องตลาด (2) บล็อกไดอะแกรม ออกแบบให้ ทำงานอย่างต่อเนื่องโดยใช้ Block While Loop รับสัญญาณ

จากภายนอกผ่าน DAQ ทั้ง 2 เครื่อง นำสัญญาณที่รับเข้า มาดำเนินการทางคณิตศาสตร์เพื่อแปลงค่ากลับเป็นค่าจริง ซึ่งการดำเนินการจะสอดคล้องกับคุณสมบัติของอุปกรณ์ วัดสัญญาณแต่ละชนิด ได้แก่ การคูณ สำหรับสัญญาณวัด ค่าแรงดันไฟฟ้า อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ความเข้มแสง ความเร็วลม และความชื้นรังสีอาทิตย์ การลบและคูณ สำหรับสัญญาณวัดค่ากระแสไฟฟ้า การประมาณค่าในช่วง เชนเส้นสำหรับสัญญาณวัดค่าอุณหภูมิโมดูล และการดำเนินการกั้นระหว่างสัญญาณ 2 สัญญาณสำหรับค่ากำลังไฟฟ้า และ (3) ฟรอนท์พาแนล การออกแบบหน้าจอแสดงผล จะเป็นไปตามที่ได้กำหนดไว้ในบล็อกไดอะแกรม โดยมี การแสดงผลที่แตกต่างกัน ดังนี้ การแสดงผลด้วยกราฟ และตัวเลข สำหรับค่าแรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้า การ แสดงผลด้วยหน้าปัทม์และตัวเลขสำหรับความชื้นรังสีอาทิตย์

และอุณหภูมิโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ และการแสดงผลด้วยตัวเลขเพียงอย่างเดียวสำหรับอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ความเข้มแสงและความเร็วลม รวมทั้งการแสดงผลเวลาในระบบเวลาจริงและการกำหนดช่วงเวลาการบันทึกผล

การอภิปรายผล

ระบบการวัดระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อการศึกษาวิจัยที่ออกแบบสามารถวัดผลแสดงผลและบันทึกผลค่าทางไฟฟ้าและสภาพแวดล้อมที่เกี่ยวข้องกับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ได้ตามวัตถุประสงค์การวิจัย จากการทดสอบประเมินผลระบบการวัดที่ออกแบบเปรียบเทียบกับกรวัดโดยใช้มิเตอร์ พบว่า ระบบวัดที่ออกแบบสามารถวัดผล แสดงผล และบันทึกผลได้มีค่าใกล้เคียงกับที่วัดโดยใช้มิเตอร์ จากการสุ่มวัดทุก 15 นาที ซึ่งมีค่าคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (Mean Absolute Error--MAE) ตลอดวันจากการสุ่มวัดทุก 15 นาทีไม่เกินร้อยละ 3 ดังแสดงในตาราง 4 ซึ่งความคลาดเคลื่อนดังกล่าวอาจมีสาเหตุมาจากอุปกรณ์การวัดสัญญาณและช่วงเวลาของการวัดเนื่องจากระบบที่ออกแบบจะถูกสุ่มวัดค่าแบบอัตโนมัติตามที่กำหนดไว้และการวัดด้วยมิเตอร์เป็นการวัดด้วยมือซึ่งอาจมีความคลาดเคลื่อนของค่าที่ทำการวัดเนื่องจากความแตกต่างของช่วงเวลาที่นำมาเปรียบเทียบทั้งนี้ค่าความคลาดเคลื่อนของระบบวัดที่ออกแบบอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ และการทดสอบเก็บผลตลอดวันโดยสุ่มวัดทุก 1 วินาทีพบว่า ระบบวัดที่ออกแบบสามารถวัดผล แสดงผล และบันทึกผลได้ตามที่กำหนดเวลาไว้ได้ จากภาพ 20 ถึง 24 จะเห็นว่าค่าความเข้มรังสีอาทิตย์และความเข้มแสงมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันและสัมพันธ์กับกระแสและกำลังไฟฟ้าโหลดของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ทั้ง 2 ระบบ และค่าแรงดันไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าจะลดต่ำลงสัมพันธ์กับอุณหภูมิของโมดูลที่สูงขึ้น โดยผลการทดสอบแสดงให้เห็นถึงกำลังการผลิตไฟฟ้าของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 2 สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของความเข้มรังสีอาทิตย์ อุณหภูมิโมดูล และความเข้มแสงหรือการบังเงาตามสมการ (1) ถึง (4)

สรุปผลการวิจัย

การพัฒนาระบบการวัดระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อการศึกษาวิจัยตามงานวิจัยนี้ ออกแบบโดยใช้ DAQ รุ่นประหยัด NI USB-6008 จำนวน 2 เครื่อง โดยเครื่องที่ 1 ใช้สำหรับวัดสัญญาณค่าทางไฟฟ้าและอุณหภูมิโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ เครื่องที่ 2 ใช้สำหรับวัดสัญญาณค่าสภาพแวดล้อม ใช้อุปกรณ์วัดสัญญาณทั้งแบบสำเร็จรูปและที่ออกแบบขึ้นเอง เขียนบล็อกไดอะแกรมโดยมีการดำเนินการทางคณิตศาสตร์ทั้งการคูณค่า การลบและการคูณ และการประมาณค่าในช่วงเชิงเส้น ออกแบบฟรอนท์พาแนลในรูปแบบตัวเลข กราฟ และหน้าปัด รวมทั้งแสดงผลเวลาจริงและการตั้งค่าการบันทึกผล

ผลการทดสอบประเมินผลเปรียบเทียบกับมิเตอร์พบว่า ระบบวัดที่ออกแบบสามารถวัดผล แสดงผล และบันทึกผลได้โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนตลอดวันไม่เกินร้อยละ 3 สามารถทำการบันทึกผลได้ตามเวลาที่ตั้งค่าไว้ หน้าฟรอนท์พาแนลที่ออกแบบสามารถอ่านค่าได้โดยสะดวก และแสดงผลกระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้าในรูปแบบกราฟเพื่อความสะดวกในการเปรียบเทียบและเห็นแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงได้

ระบบวัดที่ออกแบบสามารถใช้ในการทดสอบเปรียบเทียบสมรรถนะการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ได้ 2 ระบบพร้อมกัน สามารถวัดค่าสภาพแวดล้อมต่าง ๆ ที่มีผลต่อกำลังการผลิตไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ความเร็วลม ความเข้มแสง ความเข้มรังสีอาทิตย์และอุณหภูมิโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ได้ โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนตลอดวันอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ สามารถนำไปใช้ในการศึกษาวิจัยระบบผลิตพลังงานแสงอาทิตย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพและเหมาะสมได้ต่อไป

ข้อเสนอแนะในการพัฒนา

พัฒนาระบบวัดผล บันทึกผล และแสดงผลให้สามารถบันทึกค่าพารามิเตอร์ชั่วขณะได้นอกเหนือจากการบันทึกผลเป็นช่วงเวลาเพียงอย่างเดียว เพื่อให้สามารถนำไปใช้สำหรับการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ได้อย่างเหมาะสมมากยิ่งขึ้น



References

- Ahmed, C. B., Kassas, M., & Ahmed, S. E. (2015). LabVIEW Based PV Panel Online Characteristics and Parameters Estimation. *Procedia Computer Science*, 52, 876–882. doi:10.1016/j.procs.2015.05.145
- Chinomi, N., Leelajindakrairerk, M., Boontaklang, S., & Chompoo-Inwai, C. (2017). Design and implementation of a smart monitoring system of a modern renewable energy micro-grid system using a low-cost data acquisition system and LabVIEW™ program. *Journal of International Council on Electrical Engineering*, 7(1), 142–152. doi:10.1080/22348972.2017.1345226
- Chivapansri, K. (2007). *Graphic design of application with LabVIEW*. Bangkok: SE-EDUCATION Public.
- Fortes, R. R. A., Buzo, R. F., & de Oliveira, L. C. O. (2020). Harmonic distortion assessment in power distribution networks considering DC component injection from PV inverters. *Electric Power Systems Research*, 188, 106521. doi:10.1016/j.epsr.2020.106521
- Isdawimah, Ismujianto, Oktariza, L. G., Frederik, A., & Loc, N. P. (2019). Investigation of Photovoltaic System parameters using LabVIEW in solar irradiance peak condition. *Journal of Physics: Conference Series*, 1364, 012065. doi:10.1088/1742-6596/1364/1/012065
- LokeshReddy, M., Kumar, P. J. R. P., Chandra, S. A. M., Babu, T. S., & Rajasekar, N. (2017). Comparative study on charge controller techniques for solar PV system. *Energy Procedia*, 117, 1070–1077. doi:10.1016/j.egypro.2017.05.230
- Motahhir, S., El Hammoumi, A., & El Ghzizal, A. (2019). The most used MPPT Algorithms: Review and the suitable low-cost embedded board for each Algorithm. *Journal of Cleaner Production*, 246, 118983. doi:10.1016/j.jclepro.2019.118983
- Namhormchan, T., & Sareephattananon, A. (2014). PLC-based automatic control system of temperature and relative humidity in soilless culture greenhouse with an evaporative cooling system and fogging system. *EAU Heritage Journal Science and Technology*, 8(1), 98-111. (in Thai)
- Namhormchan, T. (2015). Comparative study of enhanced power generation from PV Array under partial shading conditions. *EAU Heritage Journal Science and Technology*, 9(3), 25-34. (in Thai)
- Namhormchan, T. (2018). *Electric circuit 1*. Pathum Thani: Eastern Asia University. (in Thai)
- Namhormchan, T. (2021). Comparative study of enhanced power generation Photovoltaic Array under partial shading conditions using Magic Square Row Shifting Technique. *EAU Heritage Journal Science and Technology*, 15(2), 247-261. (in Thai)
- Phonghirun, S., Sirininlakul, S., Phadungkit, K., Chorlumluk, P. & Boonlom, T. (2017). Effect of solar panel temperature on power output of concentrated solar system. *Srinakharinwirot Science Journal*, 33(2), 107-122. (in Thai)
- Singh, P., & Ravindra, N. M. (2012). Temperature dependence of solar cell performance-an analysis. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 101, 36–45. doi:10.1016/j.solmat.2012.02.019

- Venkateswari, R., & Rajasekar, N. (2020). Power enhancement of PV system via physical array reconfiguration based Lo Shu technique. *Energy Conversion and Management*, 215, 112885. doi:10.1016/j.enconman.2020.112885
- Watjanatepin, N. (2015). 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*, 9(special 32), 59-65.
- Yadav, K., Kumar, B., & D., S. (2020). Mitigation of mismatch power losses of PV Array under partial shading condition using novel Odd Even Configuration. *Energy Reports*, 6, 427–437. doi:10.1016/j.egyr.2020.01.012

