

การประเมินศักยภาพการผลิตกำลังไฟฟ้ากระแสตรงจากโรงไฟฟ้า
พลังงานแสงอาทิตย์ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า

Assessing the Power Generation Potential DC from Photovoltaic
Power Plants in the Power Distribution System

ปพน งามประเสริฐ¹, พูนศรี วรรณการ¹, นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ^{1*}

Papon Ngamprasert¹, Poonsri Wannakarn¹, Nattachote Rugthaicharoencheep^{1*}

¹สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

¹Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering,
Rajamangala University of Technology Phra Nakhon, Thailand
Corresponding Author. E-mail: nattachote.r@rmutp.ac.th

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้นำเสนอเทคนิคการตรวจวัดและทดสอบแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อหาข้อบกพร่องการผลิตกำลังไฟฟ้ากระแสตรงจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า โดยใช้หลักการตรวจวัดทางด้านไฟฟ้ากระแสตรง ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์รวมถึงหลักการเงื่อนไข หลักการสภาวะการทดสอบมาตรฐาน การตรวจสอบด้วยภาพความร้อนและการตรวจสอบเส้นโค้งกระแส-แรงดัน โดยมีวัตถุประสงค์ประเมินศักยภาพการผลิตกำลังไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งได้ประมวลผลทดสอบกับกรณีศึกษาโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ขนาดกำลังผลิตสูงสุด 10 เมกกะวัตต์ ที่เชื่อมต่อในระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ระดับแรงดันไฟฟ้า 22 kV ผลจากการทดสอบแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพและความสามารถในการผลิตกระแสไฟฟ้าได้สูงสุดและมีความต่อเนื่อง

คำสำคัญ : การประเมินศักยภาพ การผลิตกำลังไฟฟ้า โรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ระบบจำหน่ายไฟฟ้า

ABSTRACT

This paper presents the measurement techniques and testing of the direct current (DC) to find the fault of power generation potential from photovoltaic power plants in the power distribution system. By using the principle of measuring of the direct current. With mathematical models, including principles, standard test conditions (STC), Thermal inspection (Infrared scan) and current-voltage curve (I-V Curve). With the objective of assessing the potential DC power generation. Therefore, this paper is proposed to potentially assess the direct current power generation from photovoltaic power plants 10 MWp connected in the distribution system of the

Received 07-08-2020
Revised 03-12-2020
Accepted 07-12-2020

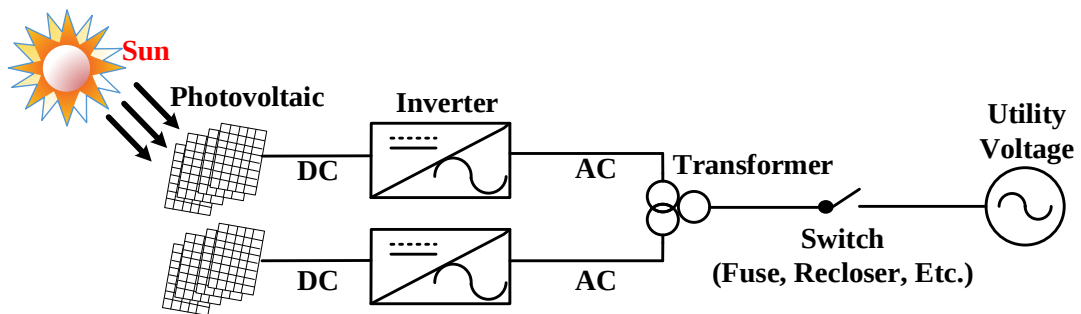
Provincial Electricity Authority, voltage level 22 kV. Test results show that evaluating the potential direct current power generation can know the efficiency and current generating capacity maximum power and continuity.

Keyword: Potential Assessment, Power Generation, Photovoltaic Power Plants, Distribution System

1. บทนำ

ในปัจจุบันระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อระบบจำหน่ายหรือโรงไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ (PV power plant) [1] เป็นระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อระบบจำหน่าย สำหรับโรงไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์บางครั้งเรียกว่าโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อระบบจำหน่าย (Grid-connected PV power plant) [2] ดังแสดง

ในภาพที่ 1 เป็นหนึ่งในระบบเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดใหญ่เพื่อผลิตไฟฟ้าป้อนเข้าระบบจำหน่ายไฟฟ้า ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงไฟฟ้ากระแสตรงที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์เป็นไฟฟ้ากระแสสลับที่แรงดันและความถี่เดียวกับระบบจำหน่ายโดยผ่านมิเตอร์ซื้อ (Debit) และมิเตอร์ขาย (Credit) ซึ่งใช้วัดปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ซื้อหรือขายให้การไฟฟ้า



ภาพที่ 1 ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (Photovoltaic power generation system)

ระบบไฟฟ้ากระแสตรง (DC power system) แผงเซลล์แสงอาทิตย์จะผลิตไฟฟ้ากระแสตรงป้อนให้แก่วงจรไฟฟ้า โดยไม่มีอุปกรณ์แปลงพลังงานไฟฟ้า ระบบไฟฟ้ากระแสสลับ (AC power system) แผงเซลล์แสงอาทิตย์จะผลิตไฟฟ้ากระแสตรงป้อนให้แก่อุปกรณ์ที่แปลงพลังงานไฟฟ้าจากกระแสตรงเป็นกระแสสลับซึ่งเรียกว่า อินเวอร์เตอร์ (Inverter) โดยส่วนใหญ่จะทำหน้าที่แปลงพลังงานไฟฟ้าพร้อมทั้งควบคุมและปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าด้วย [3]

พารามิเตอร์ที่บ่งบอกประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ประกอบด้วย กระแสลัดวงจร (I_{sc}) แรงดันวงจรเปิด (V_{oc}) และฟิลต์แฟกเตอร์ (FF) [4] นอกจากนี้มีพารามิเตอร์เกี่ยวกับความต้านทานในเซลล์แสงอาทิตย์เป็นประโยชน์ต่อการติดตามพฤติกรรมของเซลล์แสงอาทิตย์และการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ โดยคิดจากสัดส่วนระหว่างค่าแรงดันสูงสุดต่อกระแสที่ทำงานสูงสุดหรืออาจใช้สัดส่วนระหว่างค่าแรงดันวงจรเปิดต่อกระแสลัดวงจร [5]

ดังนั้นบทความวิจัยนี้นำเสนอเทคนิคการตรวจวัดและทดสอบแรงดันไฟฟ้าและไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อหาข้อบกพร่องการผลิตกำลังไฟฟ้ากระแสตรงจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ขนาด 10 เมกกะวัตต์ จังหวัดเพชรบุรีในระบบจำหน่ายไฟฟ้า โดยใช้หลักการตรวจวัดทางด้านไฟฟ้ากระแสตรง ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์รวมถึงหลักการเงื่อนไขหลักการสภาวะการทดสอบมาตรฐาน การตรวจสอบด้วยภาพความร้อนและการตรวจสอบเส้นโค้งกระแส-แรงดัน โดยมีวัตถุประสงค์ประเมินศักยภาพการผลิตกำลังไฟฟ้ากระแสตรงจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ขนาด 10 เมกกะวัตต์ จังหวัดเพชรบุรีในระบบจำหน่ายไฟฟ้า [6-7]

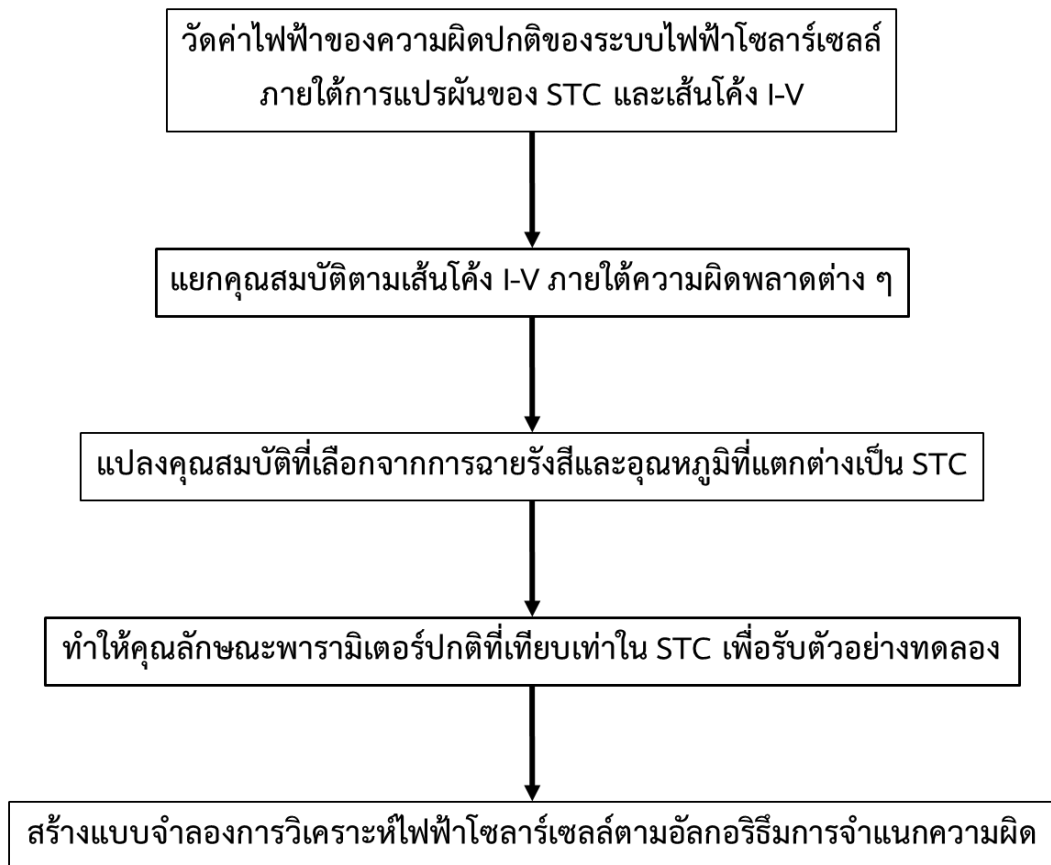
2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 หลักการประเมินศักยภาพ

หลักการตรวจวัดทางด้านไฟฟ้ากระแสตรง (Direct current: DC) ประกอบด้วย แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic panel) กล่องต่อสายของระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (PV module junction box) สายไฟฟ้าวงจรอนุกรมของระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (PV string cable) กล่องรวมสายของระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (Array combiner box) สายไฟฟ้าด้านออกของระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (PV array cable) และอินเวอร์เตอร์ (Inverter)

โดยใช้หลักการสภาวะการทดสอบมาตรฐาน (Standard test conditions: STC) การตรวจสอบด้วยภาพความร้อน (Infrared scan or thermal inspection) และการตรวจสอบเส้นโค้งกระแส-แรงดัน (I-V Curve or I-V checker) สภาวะทดสอบมาตรฐานสำหรับการทดสอบระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (PV cell) และ (PV module) ประกอบด้วย อุณหภูมิของ PV cell เป็น 25 องศาเซลเซียส ความเข้มแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนระนาบของ PV cell หรือ PV module ต้องวัดได้ 1,000 วัตต์ต่อตารางเมตร สเปกตรัมของแสงอาทิตย์ต้องสอดคล้องกับมวลอากาศ (Atmospheric air mass) ที่ 1.5 [8] การตรวจสอบด้วยภาพความร้อน (Infrared Scan)

กล่องที่ไวต่อการแผ่รังสีอินฟราเรดสามารถนำมาใช้เพื่อตรวจสอบบริเวณที่อุณหภูมิไม่สม่ำเสมอ ความไม่สม่ำเสมอของอุณหภูมิสามารถบ่งชี้ถึงปัญหาภายในชุดประกอบการเชื่อมต่อกันทางไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (PV array) ได้ การตรวจสอบเส้นโค้งกระแส-แรงดัน (I-V curve) ของ PV array เป็นตัวบ่งชี้ที่ดีสำหรับบอกความถูกต้องในการติดตั้งและการทำงานของส่วนประกอบต่าง ๆ ภายใน PV array การวัดทำได้ด้วยโหลดแบบโปรแกรมได้ (Programmable load) หรือ โหลดแบบตัวเก็บประจุ การวัดควรเป็นไปตามมาตรฐาน IEC 61829 ตามขั้นตอนการตรวจสอบเส้นโค้งกระแส-แรงดัน (I-V curve) [9] ดังแสดงในภาพที่ 2



ภาพที่ 2 ขั้นตอนการตรวจสอบเส้นโค้งกระแส-แรงดัน (I-V curve)

2.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

แรงดันเปิดวงจรของ PV module ($V_{OC\ MOD}$) ที่สภาวะทดสอบมาตรฐาน ตามที่ระบุโดยผู้ผลิตในรายละเอียดของผลิตภัณฑ์ แรงดันเปิดวงจรของ PV array ($V_{OC\ ARRAY}$) ที่สภาวะทดสอบมาตรฐาน โดยมีค่าตามสมการที่ (1)

$$V_{OC\ ARRAY} = V_{OC\ MOD} \times M \quad (1)$$

โดยที่ M เป็นจำนวนวงจรที่ต่ออนุกรมของ PV module ใน PV string ใดๆ ใน PV array

แรงดันสูงสุดของ PV array ถูกพิจารณาให้มีค่าเท่ากับ $V_{OC\ ARRAY}$ ที่ปรับแก้สำหรับอุณหภูมิทำงาน คาดว่าต่ำสุดดังสมการที่ (2)

$$PV_{array} = V_{OC\ array} + \gamma_V(T_{min} - T_{STC})M \quad (2)$$

โดยที่	$V_{OC\ ARRAY}$	คือ	แรงดันเปิดวงจร ณ สภาวะทดสอบมาตรฐาน (หน่วยเป็นโวลต์)	นำมาใช้เพื่อประเมินค่าความเข้มแสงในระนาบเดียวกัน ด้วยความแม่นยำ $\pm 2\%$
	γ_V	คือ	สัมประสิทธิ์แรงดัน อุณหภูมิ ($V / ^\circ C / module$) ที่ผู้ผลิตระบุ (มีค่าเป็นลบ สำหรับชนิดผลึกซิลิกอน)	โดยที่ $I_{SC\ EXPETED}$ คือ ค่ากระแสลัดวงจรที่คาดการณ์ในส่วนที่ทำการทดสอบ
	T_{min}	คือ	อุณหภูมิคาดว่าต่ำสุดของวันตลอดทั้งปีของเซลล์ (หน่วยเป็นองศาเซลเซียส)	n คือ จำนวนของ PV string ที่ต่อขนานกันภายในส่วนที่ทำการทดสอบ
	T_{STC}	คือ	อุณหภูมิของเซลล์ ณ สภาวะทดสอบมาตรฐาน (หน่วยเป็นองศาเซลเซียส)	$I_{SC\ MOD}$ คือ กระแสลัดวงจรของ PV module (ข้อมูลจากผู้ผลิต)
	M	คือ	จำนวนการต่ออนุกรมของ PV module ในแถว	G_1 คือ ความเข้มแสงในแนวระนาบของ PV array (W/m^2)
				0.95 คือ ตัวประกอบสำหรับความไม่เข้ากัน (Mismatch)

กระบวนการทดสอบ ค่ากระแสลัดวงจรที่วัดได้ในแต่ละส่วนของ PV array ควรนำมาเปรียบเทียบกับค่ากระแสลัดวงจรที่คาดการณ์ดังสมการที่ (3) สามารถนำมาใช้ในการคำนวณกระแสในแต่ละส่วนของ PV array การวัดค่ากระแสควรมีความแม่นยำ $\pm 2\%$ การวัดค่าความเข้มแสงควรทำพร้อมกันกับการวัดค่ากระแสลัดวงจร เครื่องวัดความเข้มแสงอาทิตย์ (Pyranometer) หรือ PV cell อ้างอิงที่เหมาะสมควร

วิธีการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เป็นการทดสอบเปรียบเทียบสมรรถนะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทางด้านเทคนิคระหว่างแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีข้อบกพร่องกับแผงที่ปกติ (ไม่มี ข้อบกพร่อง) เพื่อเปรียบเทียบถึงประสิทธิภาพและพารามิเตอร์ดังแสดงในตารางที่ 1

ขั้นตอนการทดสอบ สามารถดำเนินการได้ดังต่อไปนี้

1. วิเคราะห์ข้อมูลระบบตามมาตรฐาน IEC 61724 ก่อนและหลังข้อบกพร่อง (Defect)

2. เลือกแผงจากทั้งสองกลุ่ม กลุ่ม 1 แผงที่มี
ข้อบกพร่อง จำนวน 10 แผง และ กลุ่ม 2 แผงที่ไม่มี
ข้อบกพร่อง จำนวน 10 แผง ดังแสดงในภาพที่ 3

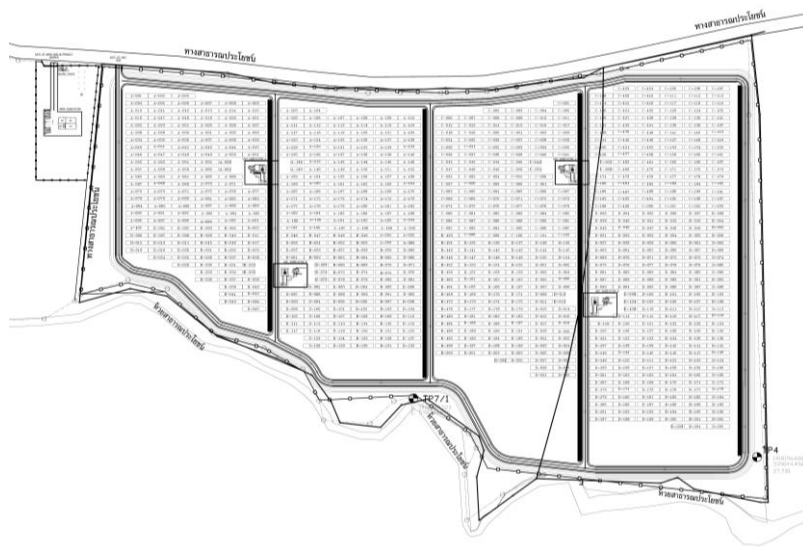
3. ทำความสะอาดแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง
สองกลุ่ม

4. ทำการตรวจวัดโดยใช้เครื่อง I-V checker
ให้(ที่ค่าความเข้มแสงอาทิตย์ไม่น้อยกว่า 700 W/m²)

5. วิเคราะห์ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับข้อบกพร่อง

6. วิเคราะห์ผลกระทบข้อมูลของแผงที่มี
ข้อบกพร่องกับระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งอยู่

7. ใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนแผงที่มี
ข้อบกพร่องกับแผงที่ไม่มีข้อบกพร่อง เพื่อทำการ
วิเคราะห์ข้อมูล (เพราะแผงที่มีการบังเงาหรือจุดต่าง ๆ
จะส่งผลให้แผงเกิด Hotspot)



ภาพที่ 3 การกำหนดเลือกจากแผงที่มีข้อบกพร่อง กับแผงที่ไม่มีข้อบกพร่อง [10]

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ที่ทำการตรวจวัด

ลำดับ	พารามิเตอร์ (Parameters)	สัญลักษณ์
1	กำลังไฟฟ้าสูงสุด (Maximum power)	Pmax (W)
2	แรงดันไฟฟ้าสูงสุด (Maximum voltage)	Vm (V)
3	กระแสไฟฟ้าสูงสุด (Maximum current)	Im (A)
4	แรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจร (Open circuit voltage)	Voc (V)
5	กระแสไฟฟ้าขณะลัดวงจร (Short circuit current)	Isc (A)
6	ความแตกต่างของกำลังไฟฟ้าจาก STC (Difference of measured maximum power from nominal power @ STC)	DPmax (%)
7	ฟิลล์แฟกเตอร์ (Fill factor)	FF (%)

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

3.1 กรณีศึกษา

หลักการตรวจวัดทางด้านไฟฟ้ากระแสตรง (Direct current: DC) โดยใช้หลักการสภาวะการทดสอบมาตรฐาน (Standard test conditions: STC)

การตรวจสอบด้วยภาพความร้อน (Infrared

scan or thermal inspection) [11] จากผลการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ยี่ห้อ TALESUN รุ่น TP67P 315W ชนิด Polycrystalline และ ยี่ห้อ JA SOLAR รุ่น JAP6 72-310/3BB ชนิด Multicrystalline Silicon ดังแสดงในตารางที่ 2 ทั้งกรณีที่ 1 และกรณีที่ 2 ดังแสดงในภาพที่ 4-9 พบว่ามีค่าต่ำกว่าค่ากำลังการผลิตของผลิตภัณฑ์

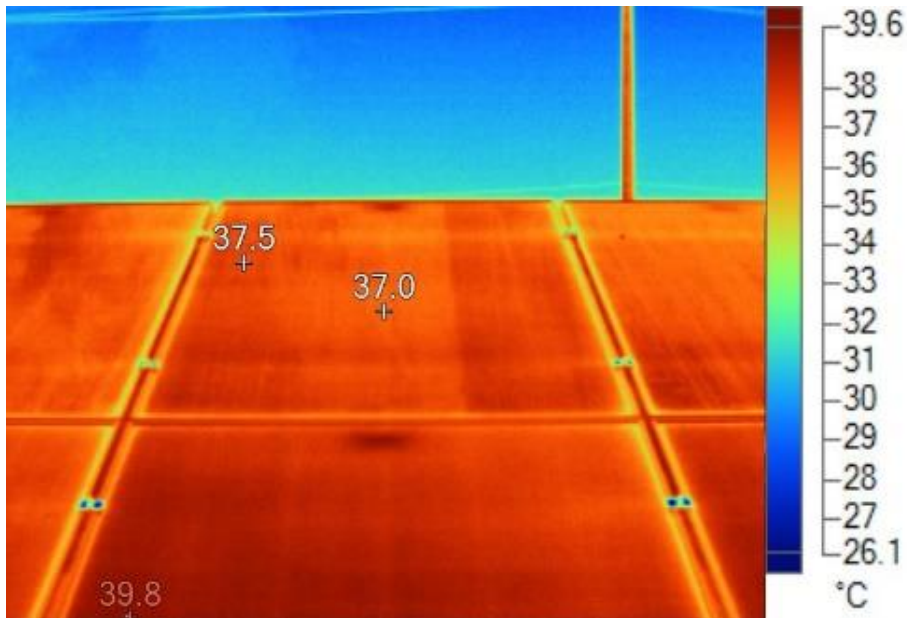
ตารางที่ 2 ผลการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์

กรณีที่	สถานที่ทำการวัด	ภาพความร้อน [°C]	กำลังไฟฟ้าสูงสุด Pmax [W]
1	A27U8 S/N:15AP6072A2006878	25.6°C ถึง 39.8°C	126.3
2	B25U15 S/N:15AP6072A2003518	29.4°C ถึง 52.1°C	134.3

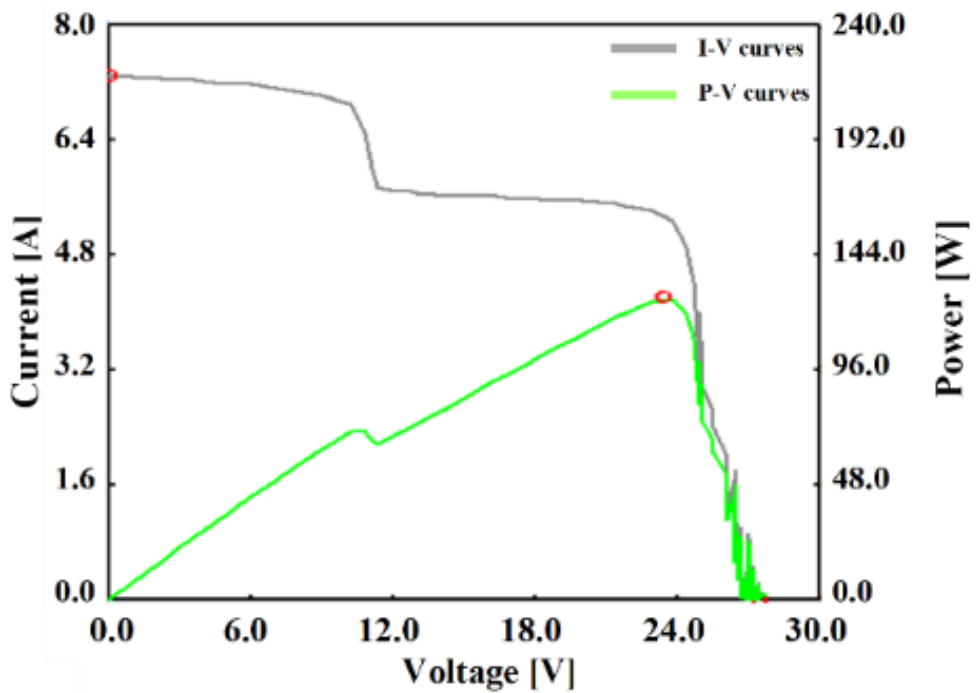
-



ภาพที่ 4 ภาพแสงที่มองเห็นได้ (Visible light image) สถานที่: A27U8 S/N:15AP6072A2006878



ภาพที่ 5 การตรวจสอบด้วยภาพความร้อน (Infrared scan) IR_00298.IS2



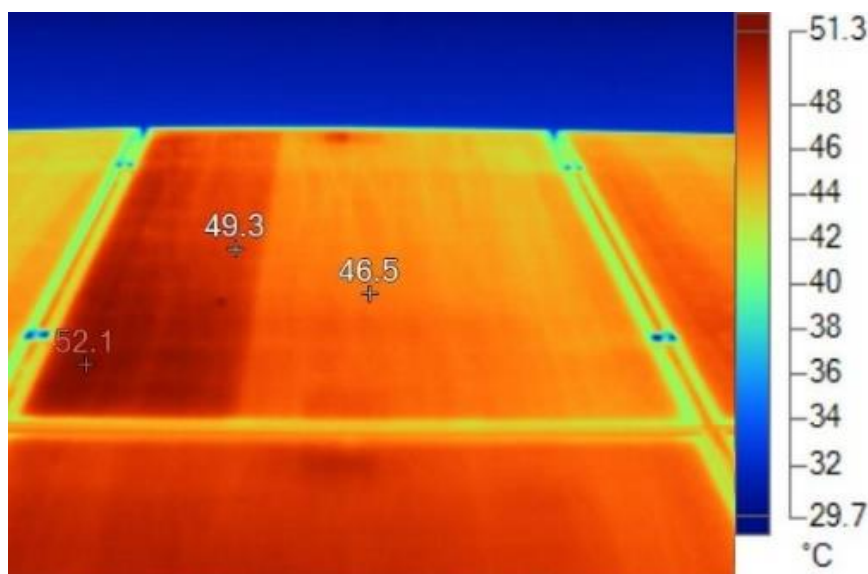
ภาพที่ 6 การตรวจสอบเส้นโค้งกระแส-แรงดัน (I-V Curve) A27U8

จากภาพที่ 5 อุณหภูมิความร้อนจากภาพ
ความร้อนด้วยเครื่องมือวัด Thermal Imager รุ่น
TE19-0114 อยู่ระหว่าง 25.6°C ถึง 39.8°C มีค่า

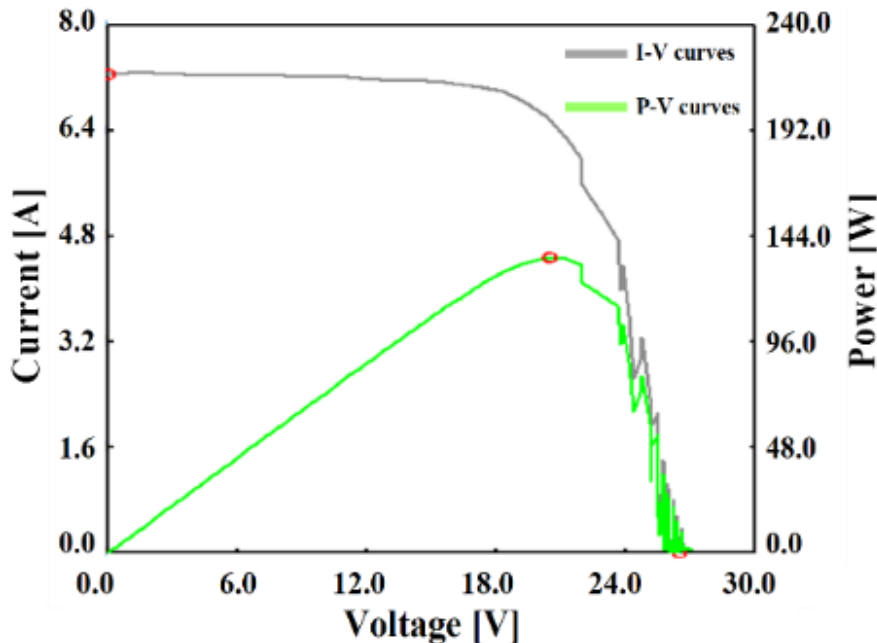
กำลังไฟฟ้าสูงสุด Pmax ด้วยเครื่องมือวัด I-V
Checker ยี่ห้อ EKO รุ่น MP-11 I-V Checker อยู่ที่
126.3 วัตต์ ดังแสดงในภาพที่ 6



ภาพที่ 7 ภาพแสงที่มองเห็นได้ (Visible light image) สถานที่: B25U15 S/N : 15AP6072A2003518



ภาพที่ 8 การตรวจสอบด้วยภาพความร้อน (Infrared scan) IR_00304.IS2



ภาพที่ 9 การตรวจสอบเส้นโค้งกระแส-แรงดัน (I-V curve) B25U15

จากภาพที่ 8 อุณหภูมิความร้อนจากภาพความร้อนด้วยเครื่องมือวัด Thermal Imager รุ่น TE19-0114 อยู่ระหว่าง 29.4°C ถึง 52.1°C มีค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด P_{max} ด้วยเครื่องมือวัด I-V Checker ยี่ห้อ EKO รุ่น MP-11 I-V Checker อยู่ที่ 134.3 วัตต์ ดังแสดงในภาพที่ 9

จากกรณีที่ 1 ในตารางที่ 2 มีค่าแรงดันเปิดวงจร ณ สภาวะทดสอบมาตรฐานดังสมการที่ 1 $V_{OC\text{ ARRAY}}$ เท่ากับ 548.841 โวลต์ โดยสมการที่ 2 มีค่า PV_{array} เท่ากับ 572.211 และค่า $I_{SC\text{ EXPECTED}}$ ดังสมการที่ 3 เท่ากับ 5.553 แอมป์ จากผลการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพของแผงมีค่าเท่ากับ $(310-126.3) / (310) \times 100$ เท่ากับ 59.258% ซึ่งมีค่าต่ำกว่าค่ากำลังการผลิตของผลิตภัณฑ์ (JA SOLAR รุ่น JAP6 72-310/3BB)

จากกรณีที่ 2 ในตารางที่ 2 มีค่าแรงดันเปิดวงจร ณ สภาวะทดสอบมาตรฐานดังสมการที่ 1 $V_{OC\text{ ARRAY}}$ เท่ากับ 528.677 โวลต์ โดยสมการที่ 2 มีค่า PV_{array} เท่ากับ 552.047 และค่า $I_{SC\text{ EXPECTED}}$ ดังสมการที่ 3 เท่ากับ 5.664 แอมป์ จากผลการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพของแผงมีค่าเท่ากับ $(310-134.3) / (310) \times 100$ เท่ากับ 56.677% ซึ่งมีค่าต่ำกว่าค่ากำลังการผลิตของผลิตภัณฑ์ (JA SOLAR รุ่น JAP6 72-310/3BB)

จากผลการทดสอบได้ใช้เครื่องมือวัด I-V Checker ยี่ห้อ EKO รุ่น MP-11 I-V Checker ดังแสดงในภาพที่ 10 และเครื่องมือวัดภาพความร้อน (Infrared scan or Thermal inspection) ยี่ห้อ Fluke Tix560 รุ่น TE19-0114 ดังแสดงในภาพที่ 11 เป็นหลักในการทดสอบและเครื่องมืออื่นๆ ทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้า



ภาพที่ 10 เครื่องมือวัด I-V Checker รุ่น MP-11 [12]



ภาพที่ 11 เครื่องมือวัด Thermal imager
รุ่น TE19-0114 [13]

4. สรุปผลการทดลอง

บทความนี้นำเสนอการประเมินศักยภาพการผลิตกำลังไฟฟ้ากระแสตรงจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ขนาด 10 เมกกะวัตต์ จังหวัดเพชรบุรี ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า จากการวิเคราะห์พบว่ามีการผลิตพลังงานไฟฟ้าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานของผลิตภัณฑ์สาเหตุจากอุณหภูมิที่สูงกว่าค่ามาตรฐานและมีการลัดวงจรภายในแผง PV cell บางส่วน ผลที่ได้จากการทดสอบเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการผลิตกำลังไฟฟ้ากระแสตรงจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ขนาด 10 เมกกะวัตต์ จังหวัดเพชรบุรี ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า ทำให้ทราบถึงความสามารถการผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุดและมีการจ่ายไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่อง

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่สนับสนุนในการทำวิจัยนี้ให้สำเร็จตามเป้าหมายอย่างสมบูรณ์

6. อ้างอิง

- [1] Pramuk U, Panot S. Reduction of Reverse Power Flow Using the Appropriate Size and Installation Position of a BESS for a PV Power Plant. IEEE Access. 2020; 8: 102897-906.
- [2] Patrick S D O, Marcelo A A L, Augusto S C, et al. Harmonic analysis based on scica at PCC of a grid-connected micro solar PV power plant. 18th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP). 2018 May 13-16; Ljubljana, Slovenia. 2018.
- [3] Ui-Min C. Study on Effect of Installation Location on Lifetime of PV Inverter and DC-to-AC Ratio. IEEE Access. 2020; 8: 86003-11.
- [4] Mark D Y, John P D C, Michael K, et al. Dynamic Real-Time I-V Curve Measurement System for Indoor/Outdoor Characterization of Photovoltaic Cells and Modules. IEEE Journal of Photovoltaics. 2015; 5(1): 337-43.

- [5] The Engineering Institute of Thailand Under H.M. The King's Patronage. Thailand Electrical Installation Standard. Solar Rooftop Power Supply Installations. 1st edit. EIT Standard 022013-16. Bangkok, THAILAND: EIT. 2013
- [6] Papon N, Sakhon W, Poonsri W, et al. Improvement for Voltage Sag with Photovoltaic Performance on Distribution System. IEET-International Electrical Engineering Transactions. 2020; 6(10): 28-33.
- [7] Papon N, Sakhon W, Poonsri W, et al. Application Improvement of Voltage Profile by Photovoltaic Farm on Distribution System. IEEE International Conference on Power, Energy and Innovations (ICPEI). 2019OCT 16-18 Pattaya, Thailand ; 98-101.
- [8] Al-Motasem I A. Development of a generalised PV model in MATLAB/Simulink using datasheet values. The Journal of Engineering. 2018; 2018(5): 257-63.
- [9] Jun-M H, Rong-J W, Wei G. Newly-Designed Fault Diagnostic Method for Solar Photovoltaic Generation System Based on IV-Curve Measurement. IEEE Access. 2019; 7: 70919-32.
- [10] แบบแผนผังโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ขนาด 10 เมกกะวัตต์. โรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์. เพชรบุรี: 2559.
- [11] Paolo B Q, Francesco G, Sonia L, et al. Light Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) for Cooperative Inspection of PV Plant. IEEE Journal of Photovoltaics. 2014; 4(4): 1107-13.
- [12] EKO MP-11 I-V Checker, Solution Type: Solar & Energy Testers > I-V Checker [Internet]. Wise Tech. Available form: <https://www.wise-tech.co.il/product/eko-mp-11-i-v-checker/>
- [13] Fluke TiX560 infrared camera with a telephoto lens 2x magnification [Internet]. FLUK. Available form: <https://www.fluke.com/th-th/product/thermal-cameras/tix560-2x-telephoto-lens-kit#country-picker-mobile>