การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 48
The 48th Electrical Engineering Conference (EECON-48)
วันที่ 19-21 พฤศจิกายน 2568 ณ โรงแรมฟูราม่า จังหวัดเชียงใหม่

การเปรียบเทียบสมรรถนะของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์โมโนคริสตัลไลน์โดยใช้ข้อมูล I-V Curve ภาคสนามด้วยแบบจำลองอุณหภูมิเซลล์สมมูล : กรณีศึกษาประเทศไทย

Performance Comparison of Monocrystalline Photovoltaic Modules from Field I–V Curves via the Equivalent Cell Temperature (ECT) Method : A Case Study of of Thailand

ปฏิญญา ศักดิ์หวาน[1]* สายัณห์ ฉายวาส[2] วีรเดช ศิริอริยพร[3]

[1]คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีจิตรลดา patinya.sak@cdti.ac.th*
[2]คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีจิตรลดา

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งอธิบายและเปรียบเทียบสมรรถนะของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโมโนคริสตัลไลน์กำลังพิกัด 550 W (monofacial mono-PERC) ที่ติดตั้งจริง 4 สถานที่ในประเทศไทย ได้แก่ กรุงเทพฯ (ลาดกระบัง) นนทบุรี (รัตนาธิเบศร์) ฉะเชิงเทรา และเชียงใหม่ โดยใช้ข้อมูลเส้นโค้งกระแส–แรงดัน (I–V) ภาคสนามเป็นฐาน แล้วคำนวณอุณหภูมิเซลล์สมมูล (Equivalent Cell Temperature; ECT) ด้วยวิธีอิงแรงดันเปิดวงจร และแปลเส้นโค้งสู่เงื่อนไขมาตรฐาน (STC) ตาม IEC 60891 เพื่อให้เปรียบเทียบข้ามพื้นที่ได้อย่างยุติธรรม กำหนดเกณฑ์คุณภาพข้อมูล (QC) เป็น G ≥ 600 W/m², อุณหภูมิโมดูล ≤ 65 °C และฟิลแฟกเตอร์ (FF) ภายใต้ STC ≥ 79% พร้อมทั้งประเมินชุดข้อมูลที่อยู่ในช่วงยอมรับของพิกัดเครื่องมือ (In-Tolerance) ±5% ผลลัพธ์ชี้ให้เห็นความแตกต่างรายพื้นที่อย่างชัดเจนภายใต้การแปลงสู่ STC ฉะเชิงเทราและเชียงใหม่มีการกระจุกตัวของกำลังใกล้ค่าพิกัดและมีอัตราผ่าน In-Tolerance สูง สะท้อนคุณภาพการวัดที่เสถียรและความเหมาะสมของกระบวนการชดเชย ในทางกลับกัน ลาดกระบังและรัตนาธิเบศร์ให้ค่ากลางของกำลังที่แปลงสู่ STC สูงกว่าพิกัดและมีอัตราผ่าน In-Tolerance ต่ำกว่า บ่งชี้ความเป็นไปได้ของการชดเชยเกินจริงเมื่อรังสีอาทิตย์ต่ำ–อุณหภูมิสูง อีกทั้งปัจจัยจากความร้อนสะสม เงาบังบางส่วน เพื่อหลีกเลี่ยงอคติของการแปลผลในเขตเมือง ข้อเสนอเพื่อการต่อยอดคือการตรวจสอบความสอดคล้องระหว่างอุณหภูมิแบบจากแบบจำลอง ECT กับการวัดจริง เพื่อสนับสนุนการตัดสินใจเชิงวิศวกรรมที่แม่นยำยิ่งขึ้น

คำสำคัญ: พลังงานแสงอาทิตย์,ประสิทธิภาพ,โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์, เส้นโค้ง I–V

Abstract

This study aims to analyze and compare the performance of 550 W monocrystalline photovoltaic (PV) modules (monofacial mono-PERC) installed at four sites in Thailand: Bangkok (Ladkrabang), Nonthaburi (Rattanathibet), Chachoengsao, and Chiang Mai. Field-measured current–voltage (I–V) curves were employed as the primary data source, from which the Equivalent Cell Temperature (ECT) was calculated using the open-circuit voltage method. The I–V curves were then translated into standard test conditions (STC) following IEC 60891, ensuring fair cross-site comparisons. Data quality control (QC) criteria were defined as irradiance G ≥ 600 W/m², module temperature ≤ 65 °C, and fill factor (FF) under STC ≥ 79%. In addition, datasets within the instrument's rated tolerance range (In-Tolerance) of ±5% were assessed.The results reveal clear site-specific variations under STC translation. Modules in Chachoengsao and Chiang Mai exhibited power distributions clustered around the nominal rating, with a high proportion of records falling within the In-Tolerance range, reflecting stable measurement quality and the suitability of the correction procedure. Conversely, Ladkrabang and Rattanathibet presented higher mean STC-translated power values compared to the nominal rating, with lower In-Tolerance rates, suggesting the possibility of over-correction under low-irradiance and high-temperature conditions. These discrepancies may also be influenced by factors such as urban heat accumulation and partial shading.To minimize interpretive bias in urban settings, future work is recommended to validate the consistency between modeled ECT and actual temperature measurements. Such validation would enhance the accuracy of engineering decision-making in PV performance evaluation .

Keywords: solar energy, performance, photovoltaic module, I–V Curve

1. บทนำ

สมรรถนะของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์(PV module) ของระบบพลังงานไฟฟ้าแสงอาทิตย์ในสภาพการทำงานจริง(Operating conditions, OPC) ได้รับอิทธิพลอย่างมากจากปัจจัยด้านสภาพแวดล้อม เช่น ค่าการแผ่รังสีแสงอาทิตย์และอุณหภูมิของโมดูล เป็นต้น [1]. ในภูมิอากาศแบบร้อนชื้นโมดูลมักทำงานที่อุณหภูมิของเซลล์สูงกว่าค่ามาตรฐาน 25 °C อย่างมาก ส่งผลให้สูญเสียกำลังไฟฟ้าอย่างมีนัยสำคัญเนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของกำลังเป็นค่าลบ. สำหรับโมดูลซิลิคอนผลึกโดยทั่วไปกำลังไฟฟ้าสูงสุดจะลดลงประมาณ 0.4–0.5% ต่อ 1 °C เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น [2]. ดังนั้น ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ระบุภายใต้เงื่อนไขการทดสอบมาตรฐาน (STC) ซึ่งเป็นอุดมคติที่ไม่สามารถควบคุมให้ตามเงื่อนภายใต้สภาพการทำงานจริงของระบบ แต่ขณะเดียวกันระดับการแผ่รังสีที่สูงสามารถเพิ่มกระแสให้กับโมดูลได้ โดยพื้นที่ที่มีรังสีเฉลี่ยสูงกว่าจะให้พลังงานไฟฟ้าได้มากกว่า. อาทิเช่น ภาคกลางของประเทศไทยถูกระบุว่ามีทรัพยากรแสงอาทิตย์สูงสุดของประเทศ (17–20 MJ/m²/วัน) และมีศักยภาพการผลิตไฟฟ้าสูงกว่าภาคเหนือหรือภาคตะวันออก[3]. อย่างไรก็ดี ความแตกต่างของภูมิอากาศและสิ่งแวดล้อม รวมถึงอุณหภูมิแวดล้อม และความสกปรกจากฝุ่นบนผิวโมดูลระหว่างภูมิภาคสามารถนำไปสู่ความแปรปรวนของสมรรถนะของระบบที่ควรได้รับการตรวจสอบโดยละเอียด

*ผู้ประพันธ์บรรณกิจ

งานวิจัยชี้ให้เห็นถึงความจำเป็นในการพิจารณาผลของภูมิอากาศท้องถิ่นเมื่อประเมินโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ พบว่าโมดูลที่มีค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่มีค่าน้อยกว่า −0.31%/°C แสดงข้อได้เปรียบด้านสมรรถนะภายใต้สภาพอากาศร้อนของไทย[4]. อีกทั้งความแปรปรวนของสเปกตรัมมีผลกระทบต่อกำลังการผลิตของโมดูลได้อย่างมาก เมื่อปรับแก้ข้อมูลภาคสนามด้วยปัจจัยสเปกตรัม พบว่าค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิที่วัดได้มีความสอดคล้องกับค่าที่ระบุในแผ่นข้อมูลผู้ผลิตมากขึ้น [5].

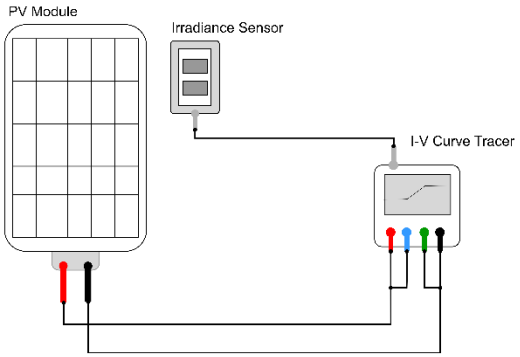
การค้นพบเหล่านี้บ่งชี้ว่าพารามิเตอร์มาตรฐานในจากข้อมูลของผู้ผลิตอาจไม่สามารถสะท้อนสมรรถนะจริงในภูมิอากาศที่แตกต่างกันได้อย่างครบถ้วน นอกจากนี้ยังมีการศึกษาในประเทศไทยที่พบว่าค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิที่วัดได้แตกต่างจากค่าของผู้ผลิต สะท้อนความสำคัญของแบบจำลองประเมินที่เฉพาะพื้นที่ในภูมิอากาศเขตร้อน [6]. จากงานวิจัยก่อนหน้านี้จำนวนมากมุ่งเน้นที่การเสื่อมสภาพระยะยาวหรือการเปรียบเทียบเทคโนโลยี โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ต่างชนิด ยังมีงานไม่มากที่ตรวจสอบว่าโมดูลรุ่นเดียวกัน ให้ผลต่างกันอย่างไรในหลายพื้นที่ภายใต้ขั้นตอนทดสอบที่เหมือนกัน

ภายใต้บริบทดังกล่าว ยังมีช่องว่างความรู้เกี่ยวกับความแตกต่างด้านสมรรถนะข้ามภูมิภาคของโมดูลชนิดเดียวกันในประเทศไทย งานนี้มุ่งเติมเต็มช่องว่างดังกล่าวด้วยการวิเคราะห์การวัดเส้นโค้งกระแส-แรงดัน (I-V Curve) ของโมดูลโมโนคริสตัลไลน์ ณ 4 สถานที่ในภูมิภาคต่างกันของประเทศไทย เรามุ่งเปรียบเทียบตัวชี้วัดหลัก คือ กำลังไฟฟ้าสูงสุด $(P_{\max})$ แรงดันวงจรเปิด (V_{OC}) กระแสลัดวงจร (I_{SC}) และฟิลแฟกเตอร์ (FF) ทั้งในสภาพการทำงานจริงและเมื่อปรับเทียบสู่ภายใต้เงื่อนไขการทดสอบมาตรฐาน (STC). เป้าหมายคือ ระบุอิทธิพลของสภาพแวดล้อมเฉพาะพื้นที่ต่อสมรรถนะของโมดูล และประเมินความแตกต่างของข้อมูลภาคสนามกับข้อกำหนดและค่าคลาดเคลื่อนที่ผู้ผลิต ข้อมูลจากการวิเคราะห์ต้องการค้นหาปัจจัยเฉพาะพื้นที่ที่ส่งผลต่อกำลังผลิต และการเทียบเคียงผลลัพธ์ข้อมูลระหว่างพื้นที่จากวิธีการปรับแก้ภายใต้เงื่อนไขการทดสอบมาตรฐาน (STC) ด้วยแบบจำลองอุณหภูมิเซลล์สมมูล

2. วิธีการดำเนินการวิจัย(Methodology)

2.1 พื้นที่ทดสอบและการติดตั้ง (Site & Installation)

การงานวิจัยนี้ทดสอบโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโมโนคริสตัลไลน์ PERC แบบด้านเดียว(Monofacial Mono-PERC) ติดตั้งบนหลังคา(rooftop) ทรงจั่วแบบอาคารเดียวกัน จำนวนตัวอย่างสถานที่ละ 50 แผ่น ใน 4 สถานที่ของไทย คือ กรุงเทพฯ(ลาดกระบัง) ,นนทบุรี(รัตนาธิเบศร์) , ฉะเชิงเทรา และเชียงใหม่ โดยควบคุมการทดสอบให้มีค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ไม่ต่ำกว่า 500 W/m² โดยเซนเซอร์วัดความเข้มรังสีอาทิตย์(Irradiance Sensor)วางอยู่บนระนาบการเอียงเดียวกันกับโมดูล อีกทั้งก่อนการตรวจวัดค่าได้ทำความสะอาดผิวหน้าโมดูลก่อนการวัด และหลีกเลี่ยงโมดูลเงาบัง(Shading) การวัดใช้เครื่องจากผู้ผลิต HT-instruments รุ่น SOLAR I-Ve โหมด AUTO Temp โดยการคำนวณอุณหภูมิเซลล์สมมูลจากวิธีการอิงแรงดันเปิดวงจร(Voc-based) แล้วปรับเส้นโค้ง I–V ไปสู่ STC ตามมาตราฐาน IEC 60891 โดยรายละเอียดโมดูลและคุณลักษณะทางไฟฟ้าอ้างอิงจาก เอกสารข้อมูลของผู้ผลิต ดังตารางที่1 และภาพการดำเนินการภาคสนาม ดังรูปที่ 1และ2.



รูปที่ 1 ผังการวัดเส้นโค้ง I–V ของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์

รูปที่ 2 การวัดเส้นโค้ง I–V ของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยเครื่องบันทึกเส้นโค้งกระแส-แรงดัน(I-V Curve)

ตารางที่ 1 รายละเอียดการติดตั้งและคุณลักษณะทางไฟฟ้าของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ในการวิจัย

พารามิเตอร์	ค่าอ้างอิง	หน่วย
กำลังไฟฟ้าสูงสุด	550	W
แรงดันวงจรเปิด	49.80	V
กระแสลัดวงจร	13.90	A
แรงดันที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด	42.20	V
กระแสที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด	13.04	A
สัมประสิทธิ์อุณหภูมิของ Voc	−0.275	%/°C
สัมประสิทธิ์อุณหภูมิของ Isc	+0.045	%/°C
สัมประสิทธิ์อุณหภูมิของ Pmax	−0.35	%/°C

2.2 การเก็บข้อมูล(Data Collection)

การวิจัยเริ่มต้นโดยการทำการวัดเส้นโค้งกระแส-แรงดัน (I-V Curve) บนโมดูล PV โมโนคริสตัลไลน์ 550 W รุ่นเดียวกัน ที่ติดตั้งใน 4 สถานที่ของไทย ได้แก่ ลาดกระบัง(ภาคกลาง) รัตนาธิเบศร์(ภาคกลาง) ฉะเชิงเทรา (ภาคตะวันออก) และเชียงใหม่(ภาคเหนือ) ใช้เครื่องบันทึกเส้นโค้งกระแส-แรงดัน(I-V Curve) แบบพกพารุ่น SOLAR I-Ve ของผู้ผลิต HT

Italia S.r.l. ในโหมด “AUTO Temp” ตามมาตรฐาน IEC 60904-5 ดังรูปที่ 1 โดยการคำนวณ อุณหภูมิเซลล์สมมูล(Equivalent Cell Temperature ,ECT) โดยใช้วิธี อุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ที่คำนวณเพื่อใช้แทนการวัดอุณหภูมิจริงจากเซนเซอร์ โดยอ้างอิงจากค่าแรงดันวงจรเปิด(Open-Circuit Voltage Method)[7] ดังสมการที่ 1

$$T_c = T_{ref} - \frac{V_{oc,meas} - V_{oc,ref}}{\beta_{Voc}} \quad (1)$$

โดยที่

T_c คือ อุณหภูมิของเซลล์ (°C)
T_{ref} คือ อุณหภูมิอ้างอิง (โดยปกติ 25°C ที่ STC)
$V_{oc,meas}$ คือ ค่าแรงดันวงจรเปิดที่วัดได้ภาคสนาม (V)
$V_{oc,ref}$ คือ ค่าแรงดันวงจรเปิดที่เงื่อนไข STC (V)
β_{Voc} คือ สัมประสิทธิ์อุณหภูมิของแรงดันวงจรเปิด [%/°C]

โดยโหมดนี้จะบันทึกลักษณะเส้นโค้ง I–V ภายใต้ค่ารังสีอาทิตย์และอุณหภูมิของโมดูล ณ ขณะวัดแล้วปรับแก้มาตรฐานไปยังเงื่อนไขอ้างอิง[8] ในแต่ละสถานที่มีโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์(PV module) 50 แผ่น เป็นกลุ่มตัวอย่างการทดลอง ในแต่ละทดสอบจะได้พารามิเตอร์สำคัญ ได้แก่ กำลังไฟฟ้าสูงสุด (P_{max}), แรงดันที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (V_{mpp})และกระแสที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (I_{mpp}), แรงดันวงจรเปิด (V_{oc}) และกระแสลัดวงจร (I_{SC}) ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ (G)และอุณหภูมิของเซลล์ (T_c) ทำการวัดโมดูลตัวอย่าง โดยเป็นรุ่นเดียวกันและอายุใกล้เคียงกัน โดยกำหนดเป็นปีที่ 0 ของการใช้งาน จึงยังไม่มีการเสื่อมสภาพอย่างมีนัยสำคัญ อีกทั้งทำความสะอาดผิวหน้าโมดูลก่อนทดสอบเพื่อลดผลกระทบจากฝุ่น จากตารางที่ 2 สรุปช่วงสภาพการวัดแต่ละสถานที่ ในภาคกลาง (ลาดกระบัง รัตนาธิเบศร์) มีค่ารังสีสูงสุดและอุณหภูมิโมดูลสูงกว่าเล็กน้อย ขณะที่เชียงใหม่มีรังสีเฉลี่ยต่ำกว่าและอุณหภูมิระดับปานกลาง การวัดทั้งหมดทำภายใต้ท้องฟ้าโปร่งหรือโปร่งเป็นส่วนใหญ่

ตารางที่ 2 ช่วงความเข้มรังสีอาทิตย์และอุณหภูมิโมดูลสภาวะการวัด

สถานที่ (Site)	ความเข้มรังสีอาทิตย์ (W/m²)	อุณหภูมิโมดูล (°C)
กรุงเทพฯ(ลาดกระบัง)	643 – 947	43.5 – 73.7
นนทบุรี(รัตนาธิเบศร์)	602 – 906	41.9 – 68.4
ฉะเชิงเทรา	624 – 804	39.8 – 59.7
เชียงใหม่	501 – 909	43.9 – 61.2

2.3 การประมวลผลข้อมูล (Data Processing)

ในส่วนการประมวลผลข้อมูลนั้น เครื่อง SOLAR I-Ve ใช้อัลกอริทึมตาม IEC 60891 เพื่อแปลงเส้นโค้ง I–V ในสภาพการทำงานจริง(Operating conditions, OPC) ตามช่วงความเข้มรังสีอาทิตย์และอุณหภูมิโมดูล ที่วัดได้ไปยังสภาวะภายใต้เงื่อนไขการทดสอบมาตรฐาน (Standard Test Condition ,STC) ที่ความเข้มรังสีอาทิตย์และอุณหภูมิโมดูล เท่ากับ 1000 W/m²และ 25 °C โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจากผู้ผลิตของ I_{SC} , V_{oc} และ P_{max} คือ $\alpha \approx +0.045\%/°C$, $\beta \approx -0.275\%/°C$, และ $\gamma \approx -0.35\ \%/°C$ ตามลำดับ โดยหลักคือปรับกระแสตามสัดส่วนความเข้มรังสีอาทิตย์ และอุณหภูมิโมดูล โดยตัวแปรต้น α และปรับแรงดันตามอุณหภูมิโดยตัวแปรต้น β เพื่อประมาณผลผลิตภายใต้ STC เครื่องหมายบวกหน้าค่า α ในรูปแบบนี้สะท้อนว่า I_{SC} จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ในทางกลับกัน สำหรับกำลังไฟฟ้าสูงสุด (P_{max}) และ แรงดันวงจรเปิด (V_{oc}) มีเครื่องหมายลบหน้าค่า γ และ β ส่งผลให้ค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ดังสมการที่ 2 , 3 และ 4

$$I_{sc,STC} = I_{sc,meas} \times \frac{1000}{G} \times [1 - \alpha(T_c - 25)] \quad (2)$$

$$V_{oc,STC} = V_{oc,meas} \times [1 - \beta(T_c - 25)] \quad (3)$$

$$P_{max,STC} = P_{max,meas} \times \frac{1000}{G} \times [1 - \gamma(T_c - 25)] \quad (4)$$

สมการข้างต้นสอดคล้องกับ IEC 60891 กระบวนการที่ 1 หลังการปรับค่าสภาวะ OPC จะได้ค่าเทียบเท่าสภาวะ STC เพื่อนำไปเทียบกับค่าพิกัดที่ STC ตามข้อมูลจากผู้ผลิต เครื่องมือยังรายงานค่าพิกัดอ้างอิง ค่าความคลาดเคลื่อน

2.4 แนวทางการวิเคราะห์ (Analysis Approach)

การวิเคราะห์เริ่มจากชุดข้อมูลที่สอดคล้องกันระหว่างค่าที่วัดภาคสนาม (operating conditions ,OPC) และค่าเงื่อนไขมาตรฐาน (standard test conditions; STC) ของ 4 สถานที่ดังตารางที่2 โดยจัด เพื่อให้ได้ตัวแปรหลักสำหรับเปรียบเทียบเพื่อคัดกรองความผิดปกติจากการแปลผลค่าเงื่อนไขมาตราฐาน (STC) จากนั้นจึงกำหนดชุดข้อมูลคุณภาพ (QC subset) เพื่อยกระดับความน่าเชื่อถือของการเปรียบเทียบ โดยกำหนดเงื่อนไข คือ (ก)ค่ารังสีอาทิตย์ขณะตรวจวัดไม่น้อยกว่า600 W/m²ตามกรอบมาตราฐานขั้นต่ำบ่ายเบนจากค่าเป้าหมาย(1,000 W/m²)ไม่น้อยกว่าร้อยละ40[8]. (ข) อุณหภูมิโมดูลไม่เกิน 65 °C เพื่อลดผลรบกวนเชิงความร้อน จากขอบเขตการทำงานที่มีประสิทธิภาพของเครื่องมือจากผู้ผลิต (ค) ฟิลแฟกเตอร์(FF) หลังการแปลงสู่เงื่อนไขมาตราฐานเป็น STC ไม่น้อยกว่าร้อยละ 79 จากข้อมูลผู้ผลิตโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์. และ การวิเคราะห์ข้อมูลที่อยู่ในพิกัด(In-Tolerance) เพื่อประเมินความสอดคล้องกับกำลังพิกัดผู้ผลิต โดยคำนวณร้อยละคลาดเคลื่อนของกำลังที่ STC เมื่อเทียบกับ 550 W และคงเฉพาะข้อมูลที่อยู่ในช่วง ±5% จากขอบเขตการบ่ายเบนของเครื่องมือจากผู้ผลิต ในเชิงสถิติจะแสดงค่าจำนวนข้อมูล ค่าเฉลี่ย (Mean) มัธยฐาน(Median) ควอไทล์หนึ่ง–สาม(Q1-Q3) รวมถึงค่าต่ำสุดและสูงสุด โดยสร้างกราฟกล่องเปรียบเทียบสามแบบ คือชุดข้อมูลทั้งหมด ,ชุดข้อมูลคุณภาพ ,ชุดข้อมูลพิกัดเกณฑ์เครื่องมือ(Full, QC subset, In-Tolerance) และแบบจัดกลุ่มทั้งสามชุดในแกน X เดียวกันของแต่ละสถานที่ เพื่อแยกอิทธิพลสองส่วนให้ชัดเจน คือ คุณภาพข้อมูลและความถูกต้องของการแปลผลสู่มาตรฐาน(STC)

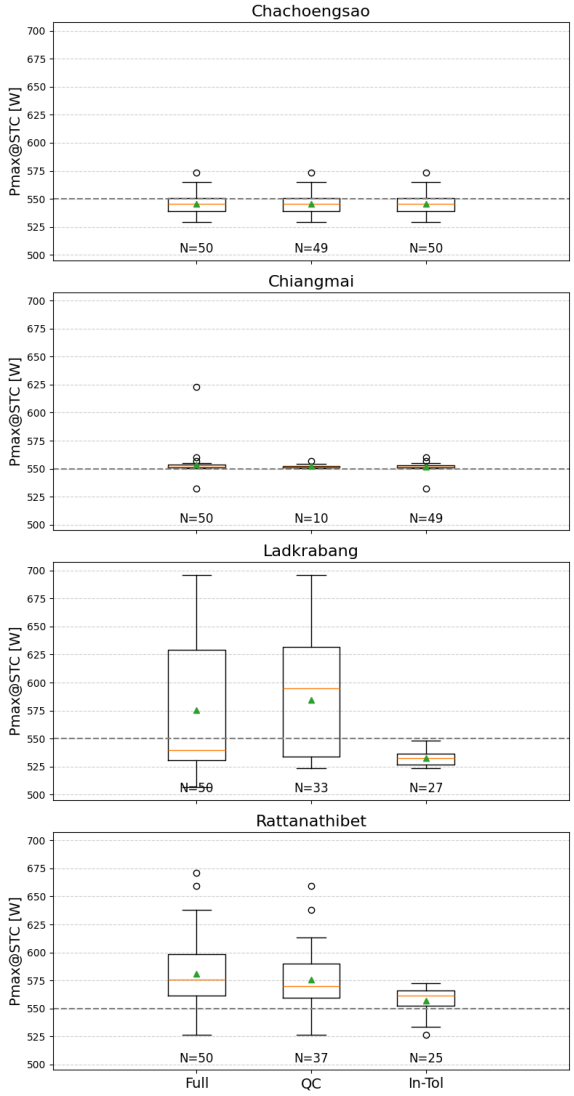
2.5 ผลการทดลอง (Results)

การวิเคราะห์นี้รายงานกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่สภาวะมาตรฐาน(STC) ภาคสนามของโมดูลชนิดโมโนคริสตัลไลน์ในสี่สถานที่ ได้แก่ ฉะเชิงเทรา เชียงใหม่ ลาดกระบัง และรัตนาธิเบศร์ โดยพิจารณาข้อมูลสามชุดย่อยคือ ชุดข้อมูลทั้งหมด(Full) ชุดที่ผ่านเกณฑ์คุณภาพการวัด(QC: G≥600 W/m², T≤65 °C, FF≥79%) และชุดที่อยู่ในช่วงยอมรับของพิกัดเครื่องมือ(In-Tolerance) คือ ±5% ของ 550 W การสรุปผลนำเสนอด้วยค่าเฉลี่ย(Mean) มัธยฐาน(Median) ช่วงควอไทล์(Q1–Q3) และจำนวนกลุ่มตัวอย่าง(N) เพื่อสะท้อนแนวโน้มส่วนกลางและการกระจายของข้อมูลในแต่ละสถานที่อย่างเป็นระบบดังรูปที่ 3

สำหรับฉะเชิงเทรา ชุดข้อมูลทั้งหมด(Full) มีค่าเฉลี่ย 545.7 W มัธยฐาน 545.6 W และช่วงควอไทล์(Q1–Q3)อยู่ที่ 538.9–550.8 W , N=50

แสดงการกระจุกตัวของข้อมูลบริเวณพิกัด 550 W ค่อนข้างชัดเจน หลังคัดกรองเป็นชุดที่ผ่านเกณฑ์คุณภาพการวัด(QC) ที่ N=49 โดยค่าเฉลี่ยแทบจะไม่เปลี่ยนแปลง และช่วงค่าต่ำสุด–สูงสุดของชุดที่ผ่านเกณฑ์คุณภาพการวัด(QC) อยู่ภายในช่วงชุดที่อยู่ในช่วงยอมรับของพิกัดเครื่องมือ(In-Tolerance) สะท้อนความเสถียรของสภาพการวัดและความถูกต้องของการแปลงสู่สภาวะมาตรฐาน(STC)

เชียงใหม่มีแนวโน้มที่สอดคล้องกัน โดยชุดข้อมูลทั้งหมด(Full) ให้ค่าเฉลี่ย 553.4 W มัธยฐาน 552.0 W และ ช่วงควอไทล์(Q1–Q3)เท่ากับ 551.0–553.4 W(N=50) สูงกว่าพิกัดเล็กน้อยและมีการกระจายแคบมาก เมื่อพิจารณาชุดที่ผ่านเกณฑ์คุณภาพการวัด(QC) ที่ N=10 ค่าเฉลี่ย 552.2 W มัธยฐาน 551.7 W และช่วงค่าต่ำสุด–สูงสุด เท่ากับ 550.6–557.1 W อยู่ในกรอบชุดที่อยู่ในช่วงยอมรับของพิกัดเครื่องมือ(In-Tolerance)ทั้งหมด ส่งผลให้ชุดที่ผ่านเกณฑ์คุณภาพการวัด(QC)ผ่าน 100% ขณะที่ชุดที่อยู่ในช่วงยอมรับของพิกัดเครื่องมือ(In-Tolerance) มีจำนวนกลุ่มตัวอย่าง 49(98%) สะท้อนคุณภาพข้อมูลที่ดีและความสม่ำเสมอของสภาพการวัด



รูปที่ 3 กราฟกล่องของการวิเคราะห์กำลังไฟฟ้าสูงสุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดภายใต้สภาวะมาตรฐาน(STC)

ตารางที่ 3 แสดงผลลัพธ์ทางสถิติของกำลังไฟฟ้าสูงสุดสภาวะภายใต้เงื่อนไขการทดสอบมาตรฐาน $P_{max,STC}$

Site	Subset	N	Mean ± SD	Median	IQR (Q1–Q3)	Range (Min–Max)
กรุงเทพฯ (ลาดกระบัง)	Full	50	575.5 ± 53	539.9	530.5–628.9	506.5–696.0
	QC	33	584.4 ± 53	595.1	534.0–631.7	523.3–696.0
	In-Tol	27	532.4 ± 6.6	532.4	527.1–536.6	523.3–548.3
นนทบุรี (รัตนาธิเบศร์)	Full	50	581.0 ± 30	576.0	561.5–598.3	526.3–670.9
	QC	37	575.6 ± 27	569.9	559.4–589.8	526.3–659.1
	In-Tol	25	557.3 ± 12	561.5	552.2–565.8	526.3–572.8
ฉะเชิงเทรา	Full	50	545.7 ± 8.9	545.6	538.9–550.8	529.5–573.5
	QC	49	545.8 ± 9	545.7	538.8–550.9	529.5–573.5
	In-Tol	50	545.7 ± 8	545.6	538.9–550.8	529.5–573.5
เชียงใหม่	Full	50	553.4 ± 10	552.0	551.0–553.4	532.6–623.2
	QC	10	552.2 ± 2	551.7	551.0–552.3	550.6–557.1
	In-Tol	49	552.0 ± 3	552.0	551.0–553.3	532.6–559.9

ลาดกระบังแสดงลักษณะการกระจายสองระบอบอย่างเด่นชัด โดยชุดข้อมูลทั้งหมด(Full) มีค่าเฉลี่ย 575.5 W แต่มัธยฐานเพียง 539.9 W และช่วงควอไทล์(Q1–Q3)เท่ากับ 530.5–628.9 W(N=50) ชี้ว่ามีกลุ่มตัวอย่างที่สูงกว่าพิกัดเป็นจำนวนหนึ่ง ชุดที่ผ่านเกณฑ์คุณภาพการวัด(QC) มีค่าเฉลี่ยยังคงสูงที่ 584.4 W มัธยฐาน 595.1 W และ ช่วงควอไทล์(Q1–Q3)อยู่ที่ 534.0–631.7 W โดยช่วงค่าต่ำสุด–สูงสุดของเกณฑ์คุณภาพการวัด(QC) เท่ากับ 523.3–696.0 W บ่งชี้ว่ายังคงมีบางกรณีไม่ผ่านเกณฑ์ ชุดที่อยู่ในช่วงยอมรับของพิกัดเครื่องมือ(In-Tolerance) ทั้งนี้ ชุดที่อยู่ในช่วงยอมรับของพิกัดเครื่องมือ(In-Tolerance) มีกลุ่มตัวอย่าง 27(54%) แสดงถึงความแตกต่างภายในสถานที่ที่สัมพันธ์กับสภาวะการวัดและพารามิเตอร์ที่ใช้ในการแปลงสู่สภาวะมาตรฐาน(STC)

รัตนาธิเบศร์มีแนวโน้มคล้ายกับลาดกระบัง โดยชุดข้อมูลทั้งหมด(Full) ให้ค่าเฉลี่ย 581.0 W มัธยฐาน 576.0 W และ ช่วงควอไทล์(Q1–Q3) เท่ากับ 561.5–598.3 W ซึ่งสูงกว่าพิกัดและมีการกระจายค่อนข้างกว้าง ชุดที่ผ่านเกณฑ์คุณภาพการวัด(QC) มีค่าเฉลี่ยลดลงเล็กน้อยเป็น 575.6 W มัธยฐาน 569.9 W และ ช่วงควอไทล์(Q1–Q3)เท่ากับ 559.4–589.8 W อย่างไรก็ดี ช่วงค่าต่ำสุด–สูงสุดของคุณภาพการวัด(QC) คือ 526.3–659.1 W ชี้ว่ายังมีกลุ่มตัวอย่างที่ไม่ผ่านเกณฑ์ชุดที่อยู่ในช่วงยอมรับของพิกัดเครื่องมือ(In-Tolerance)อยู่พอสมควร ชุดที่อยู่ในช่วงยอมรับของพิกัดเครื่องมือ(In-Tolerance) มีจำนวนกลุ่มตัวอย่าง 25 (50%) สะท้อนว่าสัดส่วนการประเมินค่าเกินขอบเขต +5% ยังมีอยู่มากในสถานที่นี้

ภาพรวมผลลัพธ์ทางสถิติทั้งสี่สถานที่ดังตารางที่ 3 พบว่าฉะเชิงเทราและเชียงใหม่มีการกระจุกตัวของข้อมูลใกล้พิกัด 550 W และอัตราการผ่าน

ของชุดที่อยู่ในช่วงยอมรับของพิกัดเครื่องมือ(In-Tolerance) สูงมาก โดยผลเกณฑ์คุณภาพการวัด(QC)แคบลงหรือแทบไม่เปลี่ยนแปลง ขณะที่ลาดกระบังและรัตนาธิเบศร์มีค่าเฉลี่ยสูงกว่าพิกัดอย่างชัดเจนและมีการกระจายกว้างกว่า ส่งผลให้อัตราการผ่านของชุดที่อยู่ในช่วงยอมรับของพิกัดเครื่องมือ(In-Tolerance)ลดลง โดยเฉพาะลาดกระบังที่แสดงลักษณะค่า Q3 ที่ยกสูงผิดปกติ

3. อภิปรายและสรุปผล (Discussion and Conclusion

ผลการวิเคราะห์กำลังไฟฟ้าสูงสุดภายใต้สภาวะมาตรฐาน(STC)ที่คำนวณจากข้อมูลแปลงเส้นโค้ง I–V ภาคสนามของโมดูลโมโนคริสตัลไลน์ทั้ง 4 สถานที่ แสดงรูปแบบที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยภาพรวมสามารถจัดกลุ่มได้เป็นสองลักษณะ ฉะเชิงเทราและเชียงใหม่ เป็นกลุ่มที่สอดคล้องกับค่าพิกัดและมีการกระจุกตัวของแน่น ได้แก่ ซึ่งมีอัตราการผ่านช่วงยอมรับของเครื่องมือ(In-Tolerance) ±5% ของ 550 W อยู่ในระดับที่สูงมาก และผลหลังคัดกรองคุณภาพการวัด (เกณฑ์คุณภาพการวัด(QC)) แทบไม่เปลี่ยนแปลง แสดงถึงความสม่ำเสมอของสภาวะการวัดและความเหมาะสมของกระบวนการแปลงกลับสู่ STC และ ลาดกระบังและรัตนาธิเบศร์ เป็นกลุ่มที่มีแนวโน้มประมาณค่าเกินพิกัดอย่างมีนัย ซึ่งให้ค่ากลาง(Mean)ของกำลังไฟฟ้าสูงสุดภายใต้สภาวะมาตรฐาน(STC)สูงกว่าพิกัด ทำให้อัตราการผ่านช่วงยอมรับของเครื่องมือ(In-Tolerance)ต่ำกว่าครึ่งในภาพรวม

เมื่อพิจารณาเชิงสถานที่ ฉะเชิงเทราให้ค่ากลาง(Mean) ใกล้พิกัด 550 W โดยอัตราการผ่านช่วงยอมรับของเครื่องมือ(In-Tolerance) ครอบคลุมข้อมูลเกือบทั้งหมดทั้งก่อนและหลัง เกณฑ์คุณภาพการวัด(QC) สะท้อนว่าข้อมูลส่วนใหญ่ได้มาภายใต้สภาวะการวัดที่เหมาะสมและความแปรปรวนต่ำ ขณะที่เชียงใหม่ให้ค่ากลาง(Mean)สูงกว่าพิกัดเล็กน้อยแต่มีช่วงกระจายแคบมาก อีกทั้งเกณฑ์คุณภาพการวัด(QC) ช่วงกระจายยิ่งแคบลงและอัตราการผ่าน ช่วงยอมรับของเครื่องมือ(In-Tolerance)อยู่ในระดับค่อนข้างสมบูรณ์ แสดงคุณภาพข้อมูลและกระบวนการชดเชยสู่สภาวะมาตรฐาน(STC) ที่น่าเชื่อถือ. สำหรับลาดกระบัง พบการกระจายสองรูปแบบในชุดข้อมูลทั้งหมด กล่าวคือ ค่ากลาง(Mean)ระดับกลางแต่มีเส้นหนวดบนของแผนภาพกล่อง(upper whisker)ยาวจนค่าเฉลี่ยและควอไทล์บนสูง เมื่อพิจารณาเกณฑ์คุณภาพการวัด(QC) ค่ากลาง(Mean)และเส้นหนวดบนของแผนภาพกล่อง(upper whisker)ที่สูงขึ้น ส่งผลให้สัดส่วนผ่านช่วงยอมรับของเครื่องมือ(In-Tolerance)ลดลงอย่างชัดเจน กรณีรัตนาธิเบศร์ก็สะท้อนภาพใกล้เคียงกัน โดยค่ากลาง(Mean)สูงกว่าพิกัดและมีช่วงกระจายกว้าง อีกทั้งเกณฑ์คุณภาพการวัด(QC) ค่ากลาง(Mean)ลดลง แต่อัตราการผ่านช่วงยอมรับของเครื่องมือ(In-Tolerance)ก็ยังอยู่ในระดับเพียงครึ่งหนึ่งของข้อมูลทั้งหมด สะท้อนความแปรปรวนของสภาวะวัดและ/หรือความไม่สอดคล้องของแบบจำลองการชดเชยสู่สภาวะมาตรฐาน(STC) ที่ยังคงอยู่

จากการค้นพบดังกล่าวสามารถอธิบายได้จากปัจจัยผสมหลายประการ **ประการแรก** ความแม่นยำของการแปลงจากสภาวะวัดภาคสนาม (OPC) ไปสู่ STC ที่พึ่งพาค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิและรังสีอาทิตย์ ซึ่งหากค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้ไม่สอดคล้องกับสภาวะจริงของโมดูลในสถานที่นั้น ๆ หรือมีความไม่แน่นอนของการวัดสภาวะการทำงานจริง(OPC) อาทิเช่น การตอบสนองมุมของเซนเซอร์รังสีอาทิตย์ และผลกระทบของสเปกตรัมในสภาวะเมฆจากความแปรปรวน จะทำให้ขนาดการชดเชยสูงเกินจริงและส่งผลให้กำลังไฟฟ้าสูงสุดภายใต้สภาวะมาตรฐาน(STC) ถูกประมาณเกินพิกัด โดยเฉพาะในช่วงรังสีอาทิตย์ต่ำและอุณหภูมิสูง **ประการที่สอง** ลักษณะสิ่งแวดล้อมเฉพาะพื้นที่ในเขตเมืองหนาแน่น เช่น ความร้อนสะสม เงาจากการบดบังบางส่วน อาจทำให้เส้นโค้ง I–V ไม่เป็นไปตามของเงื่อนไขวิธีการแปลงสู่สภาวะมาตรฐาน(STC)ที่สมบูรณ์

โดยสรุปงานวิจัยนี้ชี้ให้เห็นความสำคัญของคุณภาพการวัดภาคสนามและความเหมาะสมของแบบจำลองการชดเชยสู่วิธีการแปลงสู่สภาวะมาตรฐาน(STC)ต่อความน่าเชื่อถือของค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดภายใต้สภาวะมาตรฐาน(STC)รายสถานที่ กลุ่มฉะเชิงเทราและเชียงใหม่สะท้อนกระบวนการวัดและการแปลงที่เสถียรและสอดคล้องกับค่าพิกัด ในขณะที่กลุ่มลาดกระบังและรัตนาธิเบศร์เผยให้เห็นความแตกต่างเชิงระบบที่ต้องปรับปรุงพารามิเตอร์และกระบวนการวัดให้เฉพาะเจาะจงยิ่งขึ้น แนวทางการวิจัยที่เสนอได้แก่ การวิเคราะห์เปรียบเทียบอุณหภูมิโมดูลที่วัดจริงกับแบบจำลอง (AUTO Temp) เพื่อให้การประเมินสมรรถนะโมดูลในภาคสนามของประเทศไทยมีความแม่นยำ เปรียบเทียบกันได้ และสอดคล้องกับบริบทการใช้งานจริงในพื้นที่ระบบพลังงานไฟฟ้าแสงอาทิตย์ของประเทศไทย

เอกสารอ้างอิง

[1] Al-Ghezi, M. K., Ahmed, R. T., & Chaichan, M. T. (2022). The influence of temperature and irradiance on performance of the photovoltaic panel in the middle of Iraq. International Journal of Renewable Energy Development, 11(3), 591–603. https://doi.org/10.14710/ijred.2022.43713

[2] Salih, S. M., Jabur, Y. K., & Kadhim, L. A. (2016). Analysis of temperature effect on a crystalline silicon photovoltaic module performance. International Journal of Engineering (IJE), Transactions B: Applications, 29(5), 722–727.

[3] Yoomak, S., Patcharoen, T., & Ngaopitakkul, A. (2019). Performance and economic evaluation of solar rooftop systems in different regions of Thailand. Sustainability, 11(23), 6647. https://doi.org/10.3390/su11236647

[4] Limmanee, A., Udomdachanut, N., Songtrai, S., Kaewniyompanit, S., Sato, Y., Nakaishi, M., Kittisontirak, S., Sriprapha, K., & Sakamoto, Y. (2016). Field performance and degradation rates of different types of photovoltaic modules: A case study in Thailand. *Renewable Energy, 89*, 12–17. https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.11.088

[5] Paudyal, B. R., & Imenes, A. G. (2021). Investigation of temperature coefficients of PV modules through field measured data. Solar Energy, 224, 425–439. https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.06.013

[6] Kamkird, P., Ketjoy, N., Rakwichian, W., & Sukchai, S. (2012). Investigation on temperature coefficients of three types photovoltaic module technologies under Thailand operating condition. *Procedia Engineering, 32*, 376–383. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.01.1282

[7] IEC. (2011). IEC 60904-5: Photovoltaic devices – Part 5: Determination of the equivalent cell temperature (ECT) of photovoltaic devices by the open-circuit voltage method (Amendment 1: 2022). Geneva, Switzerland: International Electrotechnical Commission.

[8] International Electrotechnical Commission. (2021). *IEC 60891: Photovoltaic devices – Procedures for temperature and irradiance corrections to measured I-V characteristics* (3rd ed.). Geneva, Switzerland: IEC.