

การวัดลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้แสงธรรมชาติ Current-Voltage Characterization for Solar Cell at Natural Sunlight

อนนท นามิน¹ เอกพงษ์ สมรักษ์¹ กิตติพงษ์ กาควิบูลย์¹ จิตคุฤทธิ ทองปรอน²

Received: September, 2012; Accepted: December, 2012

บทคัดย่อ

การศึกษานี้ ได้เสนอวิธีการปรับแก้ค่าตามมาตรฐาน IEC 60891 ทบทวนวิธีการวัดลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้แสงธรรมชาติและแสงอาทิตย์เทียม และพัฒนาระบบการวัดลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้แสงธรรมชาติ ระบบที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วยระบบควบคุมด้วยโปรแกรม LabVIEW ผ่านบอร์ด USB - 6009 ระบบการวัดกระแส แรงดัน อุณหภูมิ และความเร็วลม และได้พัฒนาอิเล็กทรอนิกส์โหลดชนิดเครื่องขยายสัญญาณเสียง เซลล์แสงอาทิตย์ตัวอย่างเป็นชนิดผลึกย่อย ขนาด 15 x 15 ตร.ซม. ถูกทดสอบด้วยเครื่องทดสอบมาตรฐานชั้นคุณภาพ AAA และทดสอบด้วยระบบที่พัฒนาขึ้น พารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ถูกคำนวณจากลักษณะกระแส-แรงดันที่วัดและที่ได้ปรับแก้ค่าไปสู่ภาวะมาตรฐาน และพบว่า ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการปรับแก้ค่าผลการวัดภายใต้แสงธรรมชาติมีความสอดคล้องกับผลการวัดด้วยเครื่องมือมาตรฐาน

คำสำคัญ : เซลล์แสงอาทิตย์, โซลาร์เซลล์, ลักษณะกระแส-แรงดัน, แสงธรรมชาติ

Abstract

This paper presented the correction method recommended by the IEC 60891. This is followed by brief review on development of I-V characterizations at natural sunlight

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย จังหวัดเชียงราย

² คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ภาควิชาไฟฟ้า จังหวัดเชียงใหม่

E - mail : anamin@rmutl.ac.th, a.namin@hotmail.com

and solar simulators. Current-voltage characterizations at natural sunlight system have been fabricated. They are one USB-6009 LabVIEW-based acquisition unit, four measuring systems of current, voltage, temperatures, and wind speed, one audio amplifier based electronics load. A $15 \times 15 \text{ cm}^2$ poly-crystalline solar cell is tested under a commercial Simulator Class AAA and the natural sunlight measuring system. From I-V curves electrical parameters of the solar cell are determined and corrected based on methods recommended in the IEC 60891 Standards. Corrected values of parameters obtained from non STC measurements are in good agreement of those obtained from with Class AAA solar simulator.

Keywords : Photovoltaic, Solar cell, I-V characteristics, Natural sunlight

บทนำ

เซลล์แสงอาทิตย์เป็นแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้า ด้วยการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า จึงสามารถนำมาใช้ในการผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ โดยใช้แสงแดด แสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานสะอาด ไม่ก่อให้เกิดมลพิษ ไม่ต้องมีรายจ่ายค่าพลังงาน และสามารถนำมาใช้ได้ไม่สิ้นสุด ตัวอย่างเช่น ระบบผลิตไฟฟ้าสามเฟสด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ พิกัด 1 กิโลวัตต์ มีศักยภาพช่วยประหยัดพลังงานในสำนักงานแห่งหนึ่งได้ร้อยละ 10 เทียบกับพลังงานปกติที่รับจากการไฟฟ้า (Sakulpong and Pornsuwancharoen, 2010) หรือระบบป้ายสัญญาณจราจรพลังงานแสงอาทิตย์ สามารถช่วยแจ้งเตือนความปลอดภัยการใช้งานจราจรของผู้ขับขี่พาหนะ สามารถประหยัดพลังงานจากระบบไฟฟ้า อีกทั้งยังเป็นที่พึงพอใจของผู้ใช้ยานพาหนะที่พบเห็น (ประกาศิต และคณะ, 2553) เป็นต้น ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์จึงเป็นแหล่งพลังงานทดแทนที่มีศักยภาพสูงในอนาคต ปัจจุบันมีการติดตั้งระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าด้วยแสงอาทิตย์ในประเทศไทยทั้งหมด 100 เมกะวัตต์ โดยประมาณ และกระทรวงพลังงานได้กำหนดแผนส่งเสริมให้มี

การผลิตไฟฟ้าด้วยแสงอาทิตย์ให้ได้ 2,000 เมกะวัตต์ ภายในปี พ.ศ. 2564 (พลังงาน, 2551; พลังงาน, 2554-a; พลังงาน, 2554-b) (Solar Club, Thailand, 2011) ซึ่งจะทำให้มีการขยายตัวด้านระบบการผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ในประเทศไทยขึ้นอีกมากใน 10 ปีข้างหน้า

ในการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับการผลิตไฟฟ้านั้น วิศวกรผู้ออกแบบจำเป็นต้องมีการประเมินศักยภาพและพารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับการออกแบบระบบ เช่น ค่ากำลังงาน ค่าประสิทธิภาพ ค่ากระแสลัดวงจร ค่าแรงดันเปิดวงจร ค่าฟิลแฟกเตอร์ ค่าความต้านทานอนุกรม ค่าความต้านทานขนานหรือค่าความต้านทานไดนามิกของเซลล์แสงอาทิตย์ (อนนท์ และคณะ, 2555; Namin et al., 2012-a; Namin et al., 2012-b) พารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์เหล่านี้ สามารถหาค่าได้จากผลการทดสอบลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ (Thongprong et al., 2006) ดังนั้น วิศวกรจึงจำเป็นต้องมีข้อมูลผลการวัดลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่จะใช้ในการติดตั้งอยู่เสมอ

มาตรฐาน IEC 60904-1 (IEC Standards, 2006) ได้กำหนดวิธีการทดสอบลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ให้กระทำภายใต้ภาวะทดสอบมาตรฐาน (Standard testing condition, STC) 3 ประการ คือ ก) ต้องทดสอบด้วยแสงที่มีสเปกตรัมสอดคล้องกับแสงรวมที่มวลอากาศ เอเอ็ม 1.5 จี (Air mass 1.5 Global, AM 1.5 G) ข) ให้ทดสอบด้วยความเข้มแสง 1,000 วัตต์ต่อตารางเมตร และ ค) ต้องทดสอบเมื่อเซลล์แสงอาทิตย์มีอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

การทดสอบลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ตามมาตรฐาน IEC 60904-1 นั้นสามารถเลือกกระทำได้โดยใช้แสงแดดธรรมชาติ (Natural sunlight) หรือใช้แหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียม (Solar simulators) ในกรณีที่ทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์นอกภาวะทดสอบมาตรฐานนั้น ให้สามารถกระทำได้ เมื่อมีการปรับแก้ผลการทดสอบไปสู่ภาวะมาตรฐาน โดยใช้วิธีการตามมาตรฐาน IEC 60891 (IEC Standards, 2009-a)

การวัดลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยแสงแดดธรรมชาติ เป็นวิธีการตามมาตรฐานที่ใช้แสงแดดทดสอบโดยตรง จึงมีราคาถูกเนื่องจากไม่ต้องมีการจัดเตรียมแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียม แต่มีข้อจำกัด คือ ต้องทำการทดสอบในระยะเวลาที่รวดเร็ว เนื่องจากมาตรฐานกำหนดให้ทดสอบเมื่อดวงอาทิตย์มีตำแหน่งมวลอากาศ 1.5 (Air mass 1.5G) มีความเข้มอย่างน้อย 800 วัตต์ต่อตารางเมตร ขึ้นไป ท้องฟ้ามีเมฆน้อย และมีค่าความเร็วลมในขณะทดสอบน้อยกว่า 2 เมตรต่อวินาที ในการวัดจึงจำเป็นต้องมีการวัดค่าตามข้อกำหนดและทดสอบลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ภายในเวลาที่จำกัด ก่อนที่ตัวแปรต่างๆ จะเปลี่ยนค่าไป

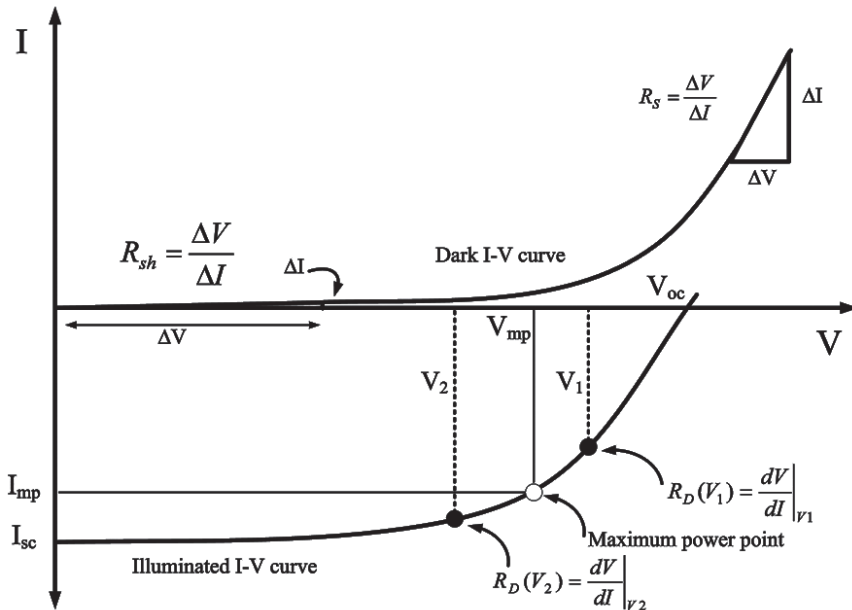
การศึกษานี้ เป็นการพัฒนาระบบการวัดลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้แสงแดดธรรมชาติ และศึกษาพารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์เปรียบเทียบกับผลการวัดภายใต้ภาวะมาตรฐาน ซึ่งจะเป็นแนวทางในการพัฒนาระบบการศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ต่อไป

การวัดลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์

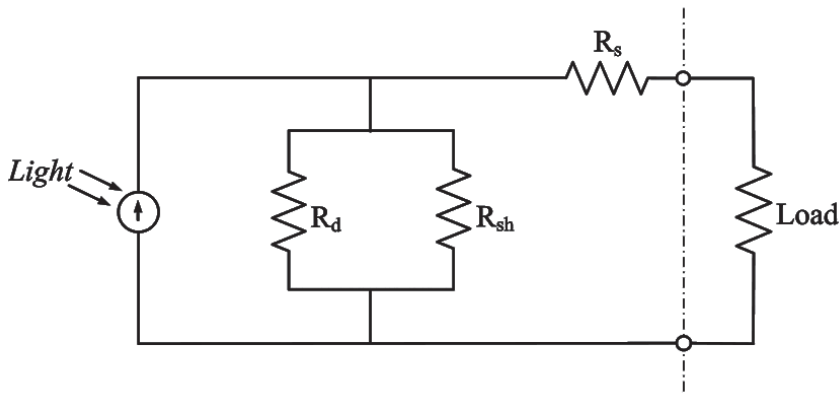
การวัดลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์จำเป็นต้องกล่าวถึงรายละเอียดของ (ก) ลักษณะกระแส-แรงดัน และพารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ (ข) มาตรฐาน IEC 60904-1 มาตรฐาน IEC 60891 และ (ค) การศึกษาทบทวนงานวิจัยเกี่ยวกับการวัดลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

ลักษณะกระแส-แรงดันและพารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์

ลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ (ดังรูปที่ 1 ก) สามารถใช้หาพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ในภาวะมืดหรือภาวะมีแสงได้ พารามิเตอร์เหล่านี้ประกอบด้วย ค่ากระแสลัดวงจร (I_{sc}) ค่าแรงดันเปิดวงจร (V_{oc}) ค่ากำลังงานสูงสุด (P_{max}) ค่าประสิทธิภาพ (η) ค่าฟิลแฟคเตอร์ (Fill factor, FF) ค่าความต้านทานอนุกรม (R_s) ค่าความต้านทานขนาน (R_{sh}) และค่าความต้านทานไดนามิก (R_d) พารามิเตอร์เหล่านี้ สามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์สมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ในภาวะต่างๆ ได้ การนำค่าพารามิเตอร์มาสร้างเป็นวงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์มีวัตถุประสงค์เพื่อใช้สำหรับการวิเคราะห์ด้วยเทคนิควงจรไฟฟ้า (ดังรูปที่ 1 ข)



ก) ลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ (Namin et al., 2012-a)



ข) วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ (Namin et al., 2012-b)

รูปที่ 1 ลักษณะกระแส-แรงดันและวงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์

มาตรฐานการวัดลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์

มาตรฐาน IEC 60904-1 (IEC Standards, 2006) หรือ IEC 60904-1 Part 1: Measurement of photovoltaic Current-Voltage characteristics ได้กำหนดวิธีการวัดลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์

ภายใต้แสงธรรมชาติหรือแสงอาทิตย์เทียม สำหรับเซลล์เดี่ยว เซลล์ประกอบ หรือแผงเซลล์

การวัดภายใต้แสงธรรมชาติให้ดำเนินการได้เมื่อค่าความเข้มแสงดวงอาทิตย์มีค่ากว้างไม่เกิน $\pm 1\%$ และถ้าต้องการปรับแก้ค่าไปสู่ภาวะมาตรฐานต้องวัดด้วยความเข้มแสงไม่น้อยกว่า 800 วัตต์ต่อตารางเมตร (W/m^2)

การวัดความเข้มแสงให้วัดด้วยไพราโนมิเตอร์ (Pyranometer) หรือ เซลล์อ้างอิง (Reference cell) ที่เป็นชนิดเดียวกับเซลล์ทดสอบ หรือได้ปรับแก้ค่าความไม่สอดคล้องของสเปกตรัมแสงตามมาตรฐาน IEC 60904-7 (IEC Standards, 2008-b) แล้ว เซลล์อ้างอิงต้องมีความไม่เป็นเชิงเส้นของค่ากระแสลัดวงจรเป็นไปตามมาตรฐาน IEC 60904-10 (IEC Standards, 2009-b) อุดหนุนของเซลล์อ้างอิงกับเซลล์ทดสอบต้องต่างกันไม่เกิน 2 องศาเซลเซียส และต้องติดตั้งทำมุมในระนาบเดียวกันกับเซลล์ทดสอบ (± 2 องศา)

การวัดค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ต้องใช้เครื่องมือวัดที่มีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน ± 2 % ของค่ากระแสลัดวงจรและค่าแรงดันเปิดวงจร สายที่ใช้วัดต้องเป็นแบบอิมพีแดนส์ โดยให้วัดที่ขั้วของเซลล์แสงอาทิตย์และให้มีระยะสั้นที่สุดเท่าที่จะทำได้ ถ้าแผงเซลล์มีขั้วต่อสายให้วัดที่ขั้วต่อสาย แต่ถ้าเป็นเซลล์เดี่ยวต้องวัดที่บัสบาร์ และในการปรับค่ากระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ให้ใช้อิเล็กทรอนิกส์โหลด

มาตรฐานการปรับแก้ค่าผลการวัดลักษณะกระแส-แรงดันไปสู่ค่าที่ภาวะมาตรฐาน

มาตรฐาน IEC 60891 Part 1: Photovoltaic devices - Procedures for temperature and irradiance corrections to measured I-V characteristics (IEC Standards, 2009-a) ได้กำหนดวิธีการปรับแก้ค่าอุณหภูมิและค่าความเข้มแสงของการวัดลักษณะกระแส-แรงดันไปสู่ค่าที่ภาวะมาตรฐาน

ในการปรับแก้ค่าผลการวัดลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์นั้น มาตรฐาน IEC 60891 ได้กำหนดให้ทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงค่ากระแสต่ออุณหภูมิ (α) สัมประสิทธิ์

การเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันต่ออุณหภูมิ (β) และค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานต่ออุณหภูมิ (κ) ของเซลล์ตัวอย่าง แล้วจึงนำไปใช้คำนวณเพื่อปรับแก้ค่ากระแส-แรงดันที่ได้จากการทดสอบเซลล์ตัวอย่างไปสู่ค่าที่ภาวะมาตรฐาน ดังสมการที่ (1 - 2)

$$I_2 = I_1 + I_{sc} \left[\frac{G_2}{G_1} - 1 \right] + \alpha \cdot (T_2 - T_1) \quad (1)$$

$$V_2 = V_1 - R_s \cdot (I_2 - I_1) - \kappa \cdot I_2 (T_2 - T_1) + \beta \cdot (T_2 - T_1) \quad (2)$$

เมื่อ

I_1, V_1 คือ ค่ากระแสและแรงดันที่วัดได้นอกภาวะมาตรฐาน

I_2, V_2 คือ ค่ากระแสและแรงดันแต่ละค่าบนเส้นโค้งที่ปรับแก้ค่าแล้ว

G_1 คือ ค่าความเข้มแสงที่วัดด้วยเซลล์อ้างอิง

G_2 คือ ค่าความเข้มแสงที่ภาวะมาตรฐาน หรือที่ค่าความเข้มแสงอื่นที่ต้องการปรับแก้ค่า

I_{sc} คือ ค่ากระแสลัดวงจรของเซลล์ทดสอบที่ G_1 และ T_1

T_1 คือ ค่าอุณหภูมิของเซลล์ทดสอบที่วัดได้

T_2 คือ ค่าอุณหภูมิที่ภาวะมาตรฐาน หรือที่ค่าอุณหภูมิอื่นที่ต้องการปรับแก้ค่า

α และ β คือ ค่าสัมประสิทธิ์ตามอุณหภูมิของกระแสและแรงดัน ตามลำดับ

κ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ตามอุณหภูมิของความต้านทาน

สมการที่ (1) และ (2) ซึ่งกำหนดไว้ในมาตรฐาน IEC 60891 สามารถนำไปใช้ปรับแก้ค่าผลการทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์ที่กระทำนอกภาวะทดสอบมาตรฐาน และทำให้สามารถหาค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ได้เช่นเดียวกับเมื่อทดสอบภายใต้ภาวะมาตรฐาน

การศึกษาทบทวนเกี่ยวกับการวัดลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์

ในช่วง 15 ปีที่ผ่านมา มีการศึกษาเกี่ยวกับการวัดลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์หลายลักษณะ ในปี 1996 W. Durisch และคณะ (Durisch et al., 1996) ได้วัดลักษณะกระแส-แรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยแสงธรรมชาติ ด้วยวิธีปรับโวลต์และส่งข้อมูลไปแสดงผล โดยคอมพิวเตอร์ ต่อมา W. M. Keogh และ A. W. Blakers (Keogh and Blakers, 2004) ได้ใช้คอมพิวเตอร์จำลองและทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้แสงธรรมชาติ และพบว่าผลการจำลองมีความไม่แน่นอนของการวัดน้อยกว่า 5 % ในขณะที่ K Kumar และคณะ (Kumar et al., 2006) ได้วัดค่าพารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอนผลึกย่อย ด้วยแสงธรรมชาติที่ความเข้ม 900 วัตต์ต่อตารางเมตร

ในปี 2010 มีการศึกษาลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์หลายผลงาน โดย Y. Atia และคณะ (Atia et al., 2010) ได้สร้างเครื่องมือวัดกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ควบคุมโดยไมโครคอนโทรลเลอร์และแสดงผลด้วยโปรแกรม LabVIEW และต่อมาในปี 2011 โดย K Agroui และคณะ (Agroui et al., 2011) ได้ใช้เครื่องมือวัดลักษณะกระแส-แรงดัน (PVPM 2540C) และเปรียบเทียบวิธีการปรับแก้ค่าผลการวัดลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธีที่แตกต่างกัน 3 วิธี คือ (ก) วิธีตามมาตรฐาน IEC 60891 (ข) วิธีของ Anderson และ (ค) วิธีของ Blaesser โดยพบว่าวิธีการปรับแก้ค่าตามมาตรฐาน IEC 60891 ให้ผลการวัดดีกว่าอีกสองวิธี ในขณะที่ F. Adamo และคณะ (Adamo et al., 2011) ได้วัดและปรับแก้ค่าผลการวัดลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ตามวิธีมาตรฐาน IEC 60891 โดยใช้ Data logger (DO9847) และใช้อิเล็กทรอนิกส์โวลต์ (2S506-4NV) ที่ควบคุม

และแสดงผลด้วยคอมพิวเตอร์ ในทำนองเดียวกัน M. Alonso และคณะ (Alonso et al., 2011) ได้วัดและปรับแก้ค่าลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธีมาตรฐาน IEC 60891 ส่วน L. Ma (Ma et al., 2011) ได้ใช้โปรแกรม LabVIEW มาควบคุมเครื่องมือวัดความต้านทานอนุกรมและความต้านทานขนาน ผ่าน GPIB port

สำหรับในประเทศไทย เอกนรินทร์ วาสนาล่ง (เอกนรินทร์, 2549) ได้วัดค่ากระแส-แรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิกอนในสภาพแวดล้อมจริง ด้วยวิธีปรับค่าความต้านทานโวลต์ที่ควบคุมด้วยโปรแกรม LabVIEW ในขณะที่ สันติ หวังนิพนพานโต (สันติ, 2549) พัฒนาเครื่องมือวัดกระแส-แรงดันของเซลล์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิกอนโดยใช้ PDX-800 Board ทำงานร่วมกับคอมพิวเตอร์ ซึ่งสามารถแสดงลักษณะกระแส-แรงดันและพารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ ต่อมา อนุรักษ เกษวัฒนา (อนุรักษ, 2553) ได้วัดค่ากระแส-แรงดันของเซลล์โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC-30F4011 สำหรับประมวลผลการวัด และแสดงผลด้วยคอมพิวเตอร์

ต่อมา ภัทรพล เวียงนาค และคณะ (ภัทรพล และคณะ, 2555) ได้พัฒนาโปรแกรมวิเคราะห์ผลการวัดสัมประสิทธิ์ตามอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยโปรแกรม MATLAB และส่งข้อมูลไปแสดงผลบนโปรแกรม Excel สำหรับ นครินทร์ ศรีปัญญา และสาธิต สิทธิโชติ (นครินทร์ และสาธิต, 2555) ได้พัฒนาโปรแกรมการหาค่าความเข้มแสงของรังสีอาทิตย์โดยใช้โปรแกรม LabVIEW คำนวณค่าความเข้มแสงจากผลการวัดค่ากระแสลัดวงจรและค่าอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอน ในขณะที่ อนุชา โพธิ์ทอง และคณะ (อนุชา และคณะ, 2555) ได้ใช้วิธีการตามมาตรฐาน IEC 60891 ปรับแก้ค่าผลการวัดลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้แสงอาทิตย์เทียมชนิดแสงผสม

ทั้งสเตนฮาโลเจน-ไดโอดเปล่งแสง และอนันท์ นานิน และคณะ ได้นำวิธีการนี้มาใช้กับผลการทดสอบด้วยหลอดไดโอดเปล่งแสง (Namin et al., 2012-a,b) ซึ่งต่างก็พบว่า ผลการทดสอบภายใต้แหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียมสามารถให้ผลสอดคล้องกับผลการวัดที่ภาวะทดสอบมาตรฐาน

การศึกษาเกี่ยวกับการวัดลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ของนักวิจัยชาวต่างประเทศและชาวไทย ส่วนใหญ่เป็นการพัฒนาเครื่องมือหรือระบบการวัดและบันทึกให้มีความรวดเร็วทันกับการเปลี่ยนแปลงของบรรยากาศแวดล้อมซึ่งมีอยู่ตลอดเวลา ในการพัฒนาเครื่องมือ นั้น มีการใช้โปรแกรมสำเร็จรูป LabVIEW การใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ หรือใช้บอร์ดควบคุมแบบดิจิทัลเพื่อวัดและแสดงผลการวัดบนคอมพิวเตอร์

ในการปรับแก้ค่า ส่วนใหญ่มีการศึกษาเกี่ยวกับการนำวิธีตามมาตรฐาน IEC 60891 มาใช้ในสถานการณ์จริง ทำให้สามารถสร้างกราฟลักษณะกระแส-แรงดัน และคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ตัวอย่างได้

วิธีดำเนินการวิจัย

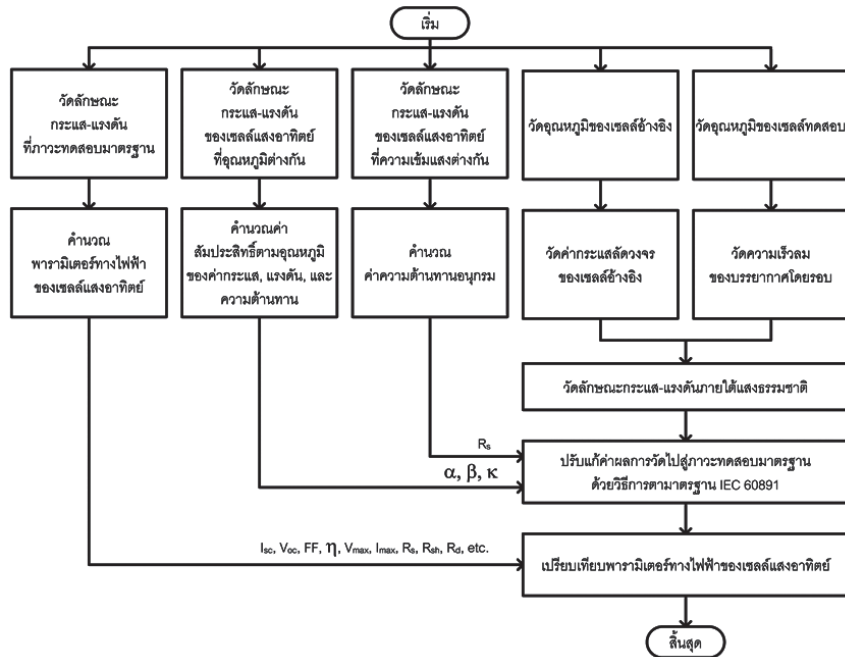
การศึกษานี้ มีกระบวนการดังรูปที่ 2 ก) เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอนผลึกย่อย (Poly crystalline silicon solar cell) ขนาด 15 x 15 ตร.ซม. ผนึกบนกระจกด้วย EVA และ Back-sheet ถูกกำหนดให้เป็นเซลล์ตัวอย่าง โดยได้วัดลักษณะกระแส-แรงดันและคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ที่ภาวะทดสอบมาตรฐานด้วยเครื่องวัดมาตรฐาน AAA (PASAN simulator) ตามมาตรฐาน IEC 60904-9 (IEC Standards, 2007) ดังรูปที่ 2 ข)

เซลล์ตัวอย่าง ถูกนำไปวัดลักษณะกระแส-แรงดันที่อุณหภูมิ 20, 25, 30, ..., 50 องศาเซลเซียส รวม 7 ค่าอุณหภูมิ เพื่อนำไปคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ตามอุณหภูมิของค่ากระแสค่าแรงดัน และค่าความต้านทาน

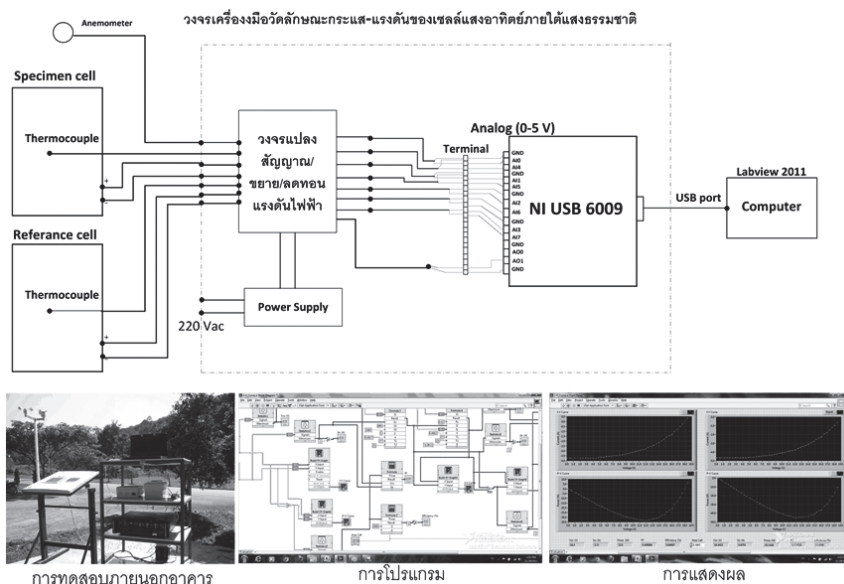
เครื่องบันทึกและประมวลผลข้อมูล USB-6009 (NI USB 6009 Data Acquisition) ที่ใช้งานร่วมกับโปรแกรม LabVIEW ถูกนำมาใช้วัดและบันทึกสัญญาณความเข้มแสงและอุณหภูมิของเซลล์อ้างอิง (Solartron, Thailand - Astro 2.75W) สัญญาณจากโพรบกระแส (Fluke 30Is) โพรบแรงดัน (HP) อุณหภูมิของเซลล์ทดสอบ (Type - T thermocouple) และค่าความเร็วลม (Anemometer) ในขณะที่เซลล์แสงอาทิตย์ถูกต่อเข้ากับเครื่องขยายกำลังย่านความถี่เสียง (Audio Power Amplifier, NPE FET 200) ซึ่งถูกควบคุมสัญญาณขาเข้าแบบไซน์ซอยด์ความถี่ 25 เฮิร์ต ด้วยโปรแกรม LabVIEW เพื่อให้ทำหน้าที่เป็น Electronic load

สัญญาณกระแส-แรงดันของเซลล์ทดสอบ ถูกนำมาวาดเป็นกราฟแสดงลักษณะกระแส-แรงดัน และถูกนำมาคำนวณเพื่อปรับแก้ค่าไปสู่ภาวะมาตรฐาน โดยใช้สมการที่ (1) และ (2) และใช้ผลการวัดค่าสัมประสิทธิ์ตามอุณหภูมิของค่ากระแส ค่าแรงดัน และค่าความต้านทานของเซลล์ทดสอบ เมื่อได้ลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ทดสอบด้วยแสงธรรมชาติแล้ว จึงสามารถคำนวณค่าพารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ได้

ลักษณะกระแส-แรงดันและพารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้แสงธรรมชาติ ที่ถูกปรับแก้ค่าไปสู่มาตรฐาน ถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลการวัดในภาวะทดสอบมาตรฐาน และคำนวณหาค่าความคลาดเคลื่อนของพารามิเตอร์



ก) กระบวนการวัดลักษณะกระแส-แรงดัน ปรับแก้ค่าไปสู่ภาวะมาตรฐาน และเปรียบเทียบพารามิเตอร์



ข) ส่วนประกอบระบบการวัดลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้แสงธรรมชาติ
รูปที่ 2 กระบวนการและส่วนประกอบของระบบการวัดในการศึกษานี้

ผลการวิจัยและอภิปราย

การศึกษาลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้แสงแดดธรรมชาติ มีผลการศึกษาประกอบด้วย พารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ภาวะทดสอบมาตรฐาน ค่าสัมประสิทธิ์ตามอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ ดังต่อไปนี้

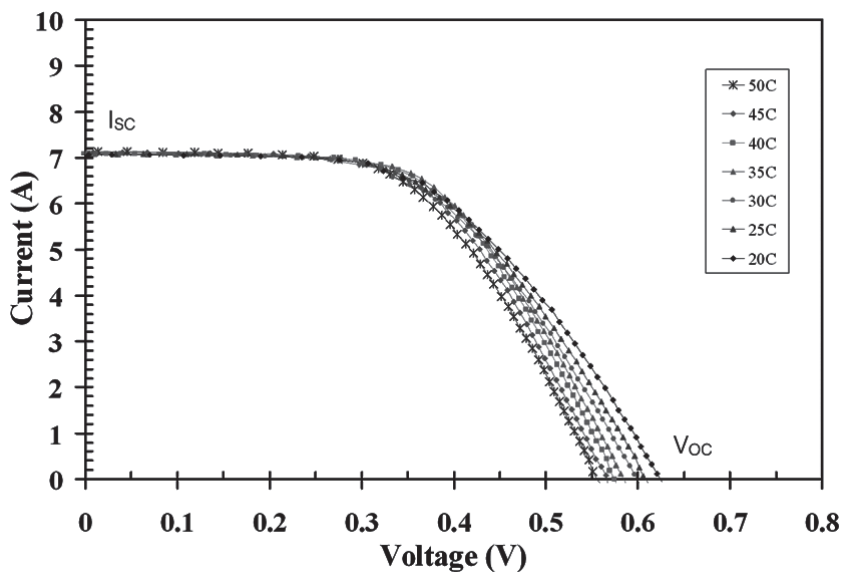
พารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ภาวะทดสอบมาตรฐาน

ที่ภาวะมาตรฐาน เซลล์ตัวอย่างมีกำลังงานสูงสุด 2.74 วัตต์ แรงดันเปิดวงจร 0.61 โวลต์ กระแสลัดวงจร 7.08 แอมแปร์ ฟิลแฟกเตอร์ 63.5 เปอร์เซ็นต์ ประสิทธิภาพ 12.1 เปอร์เซ็นต์

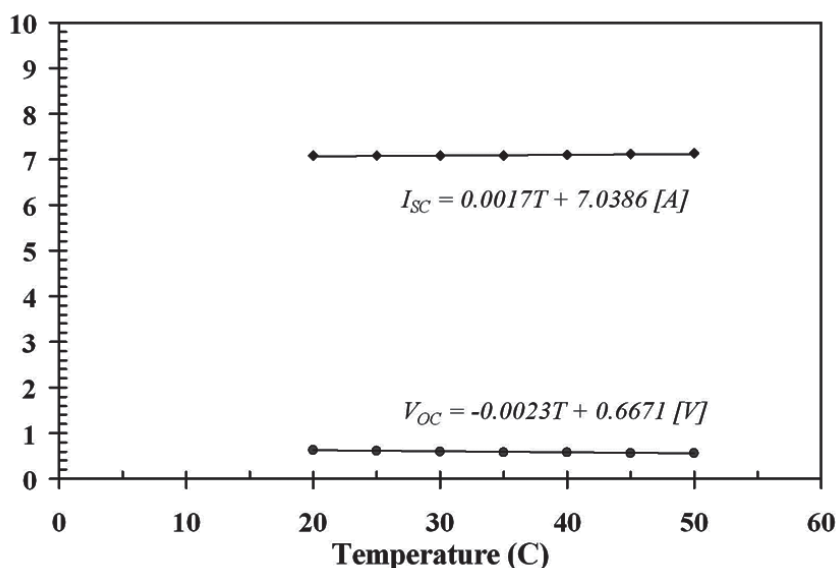
ค่าความต้านทานอนุกรม 0.02 โอห์ม และค่าความต้านทานขนาน 6.20 โอห์ม (ดังตารางที่ 1)

ค่าสัมประสิทธิ์ตามอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์

เส้นโค้งลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่วัดได้ภายใต้อุณหภูมิ 20 - 50 องศาเซลเซียส (ดังรูปที่ 3 ก) ถูกนำมาคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ตามอุณหภูมิของค่ากระแส-แรงดัน และความต้านทาน โดยวิธีการกราฟเชิงเส้น (ดังรูปที่ 3 ข) พบว่า มีค่าเท่ากับ 1.7 มิลลิแอมแปร์ต่อองศาเซลเซียส - 2.3 มิลลิโวลต์ต่อองศาเซลเซียส และ 0.2 มิลลิโอห์มต่อองศาเซลเซียส ตามลำดับ และถูกนำไปใช้สมการที่ (1) และ (2)



ก) ลักษณะกระแส-แรงดันที่อุณหภูมิต่างกัน



ข) ค่าสัมประสิทธิ์ตามอุณหภูมิ

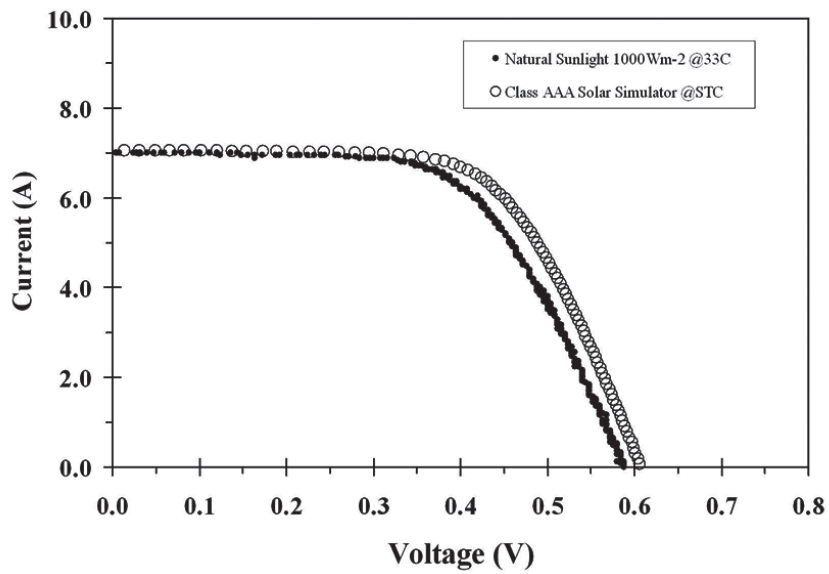
รูปที่ 3 ลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่อุณหภูมิต่างกันและค่าสัมประสิทธิ์ตามอุณหภูมิ

ลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้แสงธรรมชาติ

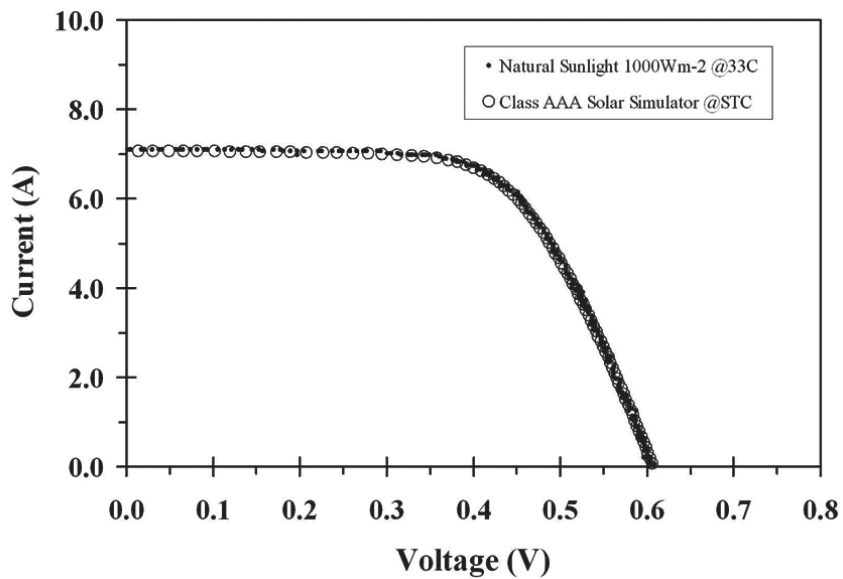
ลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้แสงธรรมชาติ (ดังรูปที่ 4 ก) แสดงให้เห็นว่า ภายใต้แสงธรรมชาติที่ความเข้ม 1,000 วัตต์ต่อตารางเมตร เซลล์ตัวอย่างมีค่ากระแสลัดวงจรเท่ากับ 7.00 แอมแปร์ ซึ่งใกล้เคียงกับผลการวัดในภาวะทดสอบมาตรฐาน โดยมีความคลาดเคลื่อนร้อยละ 1.1 ทั้งนี้ เป็นเพราะว่าสเปกตรัมแสงของแดดธรรมชาติที่ใช้ในการวัดนี้ มีความสอดคล้องหรือตรงกับสเปกตรัมของเครื่องวัดแบบมาตรฐาน AAA และสามารถอธิบายหลักการสอบเทียบได้ คือ แสงมาตรฐานตาม IEC 60904-3 (IEC Standards, 2008-a) ถูกเก็บและบันทึกจากมาแสงธรรมชาติ ที่มวลอากาศ 1.5 ของแสงรวม ดังนั้น แสงธรรมชาติและแสงมาตรฐานจึงมีสเปกตรัม

สอดคล้องกัน และเมื่อนำสเปกตรัมมาตรฐานมาสอบเทียบกับเครื่องวัดแบบมาตรฐาน AAA ตามข้อกำหนดในมาตรฐาน IEC 60904-9 (IEC Standards, 2007) แล้ว จึงอนุมานได้ว่า แสงธรรมชาติมีความสอดคล้องตรงกับแสงของเครื่องวัดมาตรฐาน AAA

ภายใต้แสงธรรมชาติ เซลล์ตัวอย่างมีค่าแรงดันเปิดวงจรเท่ากับ 0.59 โวลต์ มีค่าต่ำกว่าผลการทดสอบในภาวะมาตรฐานไปร้อยละ 3.2 เพราะว่าการทดสอบในภาวะมาตรฐานภายใต้แสงธรรมชาตินั้น เซลล์ทดสอบมีค่าอุณหภูมิเท่ากับ 33 องศาเซลเซียส ซึ่งสูงกว่าภาวะมาตรฐาน จึงทำให้มีค่าแรงดันลดลง เพราะอุณหภูมิของเซลล์ที่สูงขึ้นทำให้เกิดการรวมตัวกลับ (Recombination) ของคู่อิเล็กตรอน-โฮล (Electron-hole) ภายในรอยต่อพี-เอ็นของเซลล์ในอัตราที่สูงขึ้น



ก) ลักษณะกระแส-แรงดันภายใต้แสงธรรมชาติ



ข) ผลการปรับแก้ค่าไปสู่ภาวะมาตรฐาน

รูปที่ 4 ลักษณะกระแส-แรงดันภายใต้แสงธรรมชาติและผลการปรับแก้ค่าไปสู่ภาวะทดสอบมาตรฐาน

ผลการปรับแก้ค่าลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทดสอบด้วยแสงธรรมชาติ

เมื่อปรับแก้ค่าผลการทดสอบลักษณะกระแส-แรงดันไปสู่ภาวะมาตรฐานโดยใช้วิธีการตามมาตรฐาน IEC 60891 (IEC 60891) ทำให้ได้ลักษณะกระแส-แรงดันที่ทดสอบภายใต้ภาวะทดสอบมาตรฐานมีความสอดคล้องหรือใกล้เคียงกับผลการวัดภายใต้ภาวะทดสอบมาตรฐานเป็นอันมาก (ดังรูปที่ 4 ข)

ผลการปรับแก้ค่าลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์ตัวอย่างที่วัดด้วยแสงธรรมชาติ (ดังตารางที่ 1) ทำให้สามารถคำนวณค่าพารามิเตอร์และความคลาดเคลื่อน (ค่าในวงเล็บ) ได้ดังนี้ เซลล์มีกำลังงานสูงสุด 2.77 วัตต์ (1.1 %) แรงดันเปิดวงจร 0.61 โวลต์ (0.0 %) กระแสลัดวงจร 7.08 แอมแปร์ (0.1 %) ฟิลแฟคเตอร์ 63.5 %

(0.7 %) ประสิทธิภาพ 12.1 % (1.7 %) ความต้านทานอนุกรม 0.02 โอห์ม (0.0 %) และความต้านทานขนาน 6.20 โอห์ม (-1.6 %)

ผลการวัดลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยแสงธรรมชาติ และปรับแก้ค่าด้วยวิธีการตามมาตรฐาน IEC 60891 พบว่า เซลล์แสงอาทิตย์มีลักษณะกระแส-แรงดันสอดคล้องกับผลการวัดในภาวะทดสอบมาตรฐาน และมีค่าความคลาดเคลื่อนของพารามิเตอร์อยู่ในเกณฑ์ร้อยละ 2 ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยหลายฉบับที่ได้นำวิธีการตามมาตรฐาน IEC 60891 ไปใช้ปรับแก้ค่าผลการทดสอบการวัดลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยแสงอาทิตย์เทียม และใช้เซลล์ตัวอย่างชนิดที่แตกต่างกันไป (อนนท์และคณะ, 2555; อนุชา และคณะ, 2555; Namin et al., 2012-a; Namin et al., 2012-b)

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้แสงธรรมชาติและที่ภาวะทดสอบมาตรฐาน

พารามิเตอร์	ผลการวัดภายใต้แสงธรรมชาติ		ผลการวัดภายใต้ภาวะทดสอบมาตรฐาน (STC)
	ผลการวัดด้วยแสงธรรมชาติ (Measured)	ผลการปรับแก้ค่าด้วยวิธีตามมาตรฐาน IEC 60891 (%ความคลาดเคลื่อน)	
ความเข้มแสง, G (W/m^2)	1000	1000	1001
อุณหภูมิ, T ($^{\circ}C$)	33	25	25
แรงดันเปิดวงจร, V_{oc} (V)	0.59	0.61 (0.0%)	0.61
กระแสลัดวงจร, I_{sc} (A)	7.00	7.09 (0.1%)	7.08
กำลังงานสูงสุด, P_{max} (W)	2.54	2.77 (1.1%)	2.74
แรงดันที่จุดกำลังงานสูงสุด V_{mp} (V)	0.42	0.43 (0.0%)	0.43
กระแสที่จุดกำลังงานสูงสุด, I_{mp} (A)	6.04	6.13 (-2.0%)	6.36
ฟิลแฟคเตอร์, FF (%)	61.6	64.2 (0.7%)	63.5
ประสิทธิภาพ η (%)	11.3	12.3 (1.7%)	12.1
ความต้านทานอนุกรม, R_s (Ω)	0.02	0.02 (0.0%)	0.02
ความต้านทานขนาน, R_{sh} (Ω)	6.00	6.10 (-1.6%)	6.20

สรุป

การศึกษานี้ ได้พัฒนาระบบการวัดลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้แสงธรรมชาติ โดยได้นำอุปกรณ์ต่อพ่วงคอมพิวเตอร์ที่ใช้งานร่วมกับโปรแกรม LabVIEW เพื่อควบคุมอิเล็กทรอนิกส์โหลดแบบเครื่องขยายสัญญาณเสียงและนำเข้าผลการวัดค่ากระแส ค่าแรงดัน และค่าอุณหภูมิ ข้อมูลที่วัดและบันทึกได้นี้ ถูกนำมาใช้ในการคำนวณปรับแก้ค่าผลการวัดไปสู่ภาวะทดสอบมาตรฐาน ด้วยวิธีตามมาตรฐาน IEC 60891 ผลการศึกษาพบว่า ระบบการวัดลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้แสงธรรมชาติที่พัฒนาขึ้น ให้ผลการวัดสอดคล้องกับผลการวัดในภาวะทดสอบมาตรฐาน โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนของการวัดอยู่ในระดับร้อยละ 2

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ศูนย์พัฒนามาตรฐานและทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์ (CSSC) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่กรุณาอำนวยความสะดวกในการทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์ในภาวะทดสอบมาตรฐาน ขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา และสำนักงานบริหารโครงการส่งเสริมการวิจัยในอุดมศึกษาและพัฒนามหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา ที่สนับสนุนทุนวิจัยโครงการพัฒนาศักยภาพงานวิจัยของนักศึกษา มทร.ล้านนา ผ่านกระบวนการเรียนรู้เชิงบูรณาการการเรียนรู้กับการทำงาน

บรรณานุกรม

- นครินทร์ ศรีปัญญา และสาธิต ลิทธิโชติ. (2555). โปรแกรมวัดความเข้มแสงจากเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดเล็กด้วยโปรแกรม LabView. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 4. 3 - 5 เมษายน 2555, หนองคาย.
- ประกาศิต ดันตือลงการ, วชิรินทร์ ไชยราช, และ วรเวช ไต่เงิน. (2553). ป้ายสัญญาณจราจรใช้พลังงานแสงอาทิตย์. วารสาร มทร. อีสาน. ปีที่ 3 (ฉบับที่ 1, มกราคม - มิถุนายน 2553). หน้า 10-19.
- พลังงาน, กระทรวง. (2551). แผนพัฒนาพลังงานทดแทน 15 ปี (2551 - 2565). กระทรวงพลังงาน. หน้า 1-35.
- พลังงาน, กระทรวง. (2554-a). การปรับปรุงแผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย พ.ศ. 2553 - 2573. สำนักนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน. 14 หน้า.
- พลังงาน, กระทรวง. (2554-b). แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก 25% ใน 10 ปี (พ.ศ. 2555 - 2564). กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. 15 หน้า.
- ภัทรพล เวียงนาค, นิพนธ์ เกตุจ้อย, และประสิทธิ์ ธนารักษ์. (2555). การพัฒนาโปรแกรมวิเคราะห์ผลสำหรับเครื่องมือวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับนำไปประเมินค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิ. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 4. 3-5 เมษายน 2555, หนองคาย.

- สันติ หวังนิพนพานโต. (2549). การพัฒนาเครื่องมือวัด I-V Curve สำหรับทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์. การประชุมเชิงวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 2. 27 - 29 กรกฎาคม 2549. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา. หน้า EENET49-123-1 ถึง 4.
- อนนท์ นานอิน, จิตตฤทธิ ทองปรอน, อธิฤทธิ์ เจริญวิทยา, ชัย ชีวะเกตุ, และกฤษณพงศ์ กิรติกร. (2555). แหล่งกำเนิดแสง-อาทิตย์เทียมสำหรับการทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์. วารสารวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก. ปีที่ 5 (ฉบับที่ 2, กรกฎาคม - ธันวาคม), หน้า 48-57.
- อนุชา โพธิ์ทอง, ยุทธศักดิ์ กันทะวงศ์, เอกพงษ์ สมรัก, อติศักดิ์ แจ่มแจ่ม, และอนนท์ นานอิน. (2555). การพัฒนาแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียมสำหรับการทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์. การประชุมทางวิชาการวิทยาศาสตร์วิจัย ครั้งที่ 4. 12 - 13 มีนาคม 2555 มหาวิทยาลัยนเรศวร, หน้า PH 187-192.
- อนุรักษ เกษวัฒนานุกูล และฉัตรชัย ศุภพิทักษ์สกุล. (2553). การประยุกต์ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPic ทดสอบหาค่า I-V Curve ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์. การประชุมทางวิชาการวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 8. 22 - 23 เมษายน 2553. หน้า 345-348.
- เอกรินทร์ วาสนาลัง. (2549). ระบบบันทึกข้อมูลและวัดคุณสมบัติกระแสและแรงดันแบบพกพาสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์. การประชุมทางวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 29 (EECON-29). หน้า 317-320.
- Adomo F., Attivissimo F., Nisio F. D. and Spadavecchai M. (2011). Characterization and Testing of a tool for photovoltaic panel modeling. IEEE Transactions on instrumentation and measurement. Vol. 60 No. 5, pp. 1613-1621.
- Agroui K., Hadi A., Pellegrino M., Giovanni F., and Mahammad H. (2011), Indoor and Outdoor photovoltaic module Performances based on thin films solar cell. Revue des Energies Renouvelables. Vol. 14 No. 3 (2011). pp. 469-480.
- Alonso M. A. and Chenlo F. (2011). Determination in solar simulator of temperature coefficients and correction parameter of PV module according to international standards. The 37th IEEE-PVSC. 19 - 24 June 2011, 002225-002230.
- Atia Y., Zahran M., and Al-Hossain M. (2010). Solar cell curve measurement based on LabView Microcontroller Interfacing. The 12th WSEAS international conference on AUTOMATIC CONTROL, MODELLING & SIMULATION. pp. 59-64. ISBN: 978-954-92600-1-4.
- Durisch W., Urban J. and Smestad G. (1996). Characterization of solar cells and modules under actual operating conditions. WREC 1996. pp. 359-366.

- IEC Standards. (2006). IEC 60904-1 Part 1: Measurement of photovoltaic current-voltage characteristics. 2nd ed. pp. 1-23.
- IEC Standards. (2007). IEC 60904-9 Photovoltaic devices - Part 9: Solar simulator performance requirements. edition 2.0 pp. 1-30.
- IEC Standards. (2008-a). IEC 60904-3 Photovoltaic devices - Part 3: Measurement principles for terrestrial photovoltaic (PV) solar devices with reference spectral irradiance data. pp. 1-31.
- IEC Standards. (2008-b). IEC 60904-7 Photovoltaic devices - Part 7: Computation of the spectral mismatch correction for measurements of photovoltaic devices. edition 3.0 pp. 1-10.
- IEC Standards. (2009-a). IEC 60891 Photovoltaic devices - Procedures for temperature and irradiance corrections to measured I-V characteristics. 2.0 edition pp. 1-21.
- IEC Standards. (2009-b). IEC 60904-10 Photovoltaic devices - Part 10: Methods for linearity measurement. edition 2.0 pp. 1-13.
- Keogh W. M. and Blakers A. W. (2004). Accurate measurement, using natural sunlight, of silicon solar cells. Progress in photovoltaic: research and applications. (2004: 12), 1-19.
- Kumar K., Sharma S.D., and Jain L. (2006). Standalone photovoltaic (PV) module outdoor testing facility for UAE. <http://wenku.baidu.com/view/e18b4b3b87c24028915fc315.html>.
- Ma L., Xu L., Zhang K., Wu W., Ma Z. (2011). The measurement of Series and Shunt resistances of the silicon solar cell based on LabView. International conference on electrical and control engineering (ICECE). 2011 Sep 16 - 19, 2711-2714. DOI: 10.1109/ICECENG.2011.6058342.
- Namin A, Jivacate C, Chenvidhya C, Kirtikara K, and Thongpron J. (2012-a). Construction of tungsten halogen, pulsed LED, and combined tungsten halogen-LED solar simulators for solar cell I-V characterization and electrical parameters determination. International Journal of Photoenergy. (2012;2012:9). <http://dx.doi.org/10.1155/2012/527820>. Article ID 527820.
- Namin A, Jivacate C, Chenvidhya C, Kirtikara K, and Thongpron J. (2012-b). Determination of solar cell electrical parameters and resistances using color and white LED-based solar simulators with high amplitude pulse input voltage. Renewable Energy (2012). <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2012.08.046>.

- Sakupong R. and Pornsuwanchaoen N. (2010). Energy sufficiency potential for combination system of solar energy and electric system in North-east of Thailand. *RMUTI Journal*. Vol. 3 No. 2, pp. 15-21.
- Solar Club, Thailand. (2011). *Thailand PV Status Report 2011*. Department of Alternative Energy Development and Efficiency (DEDE) and Solar Energy Technology Laboratory (NECTEC). 23 p.
- Thongpron J, Kirtikara K, Jivacate C. (2006). A method for the determination of dynamic resistance of photovoltaic modules under illumination. *Solar Energy Material & Solar Cells*. (2006: 90), pp. 3078-84.