



แบบจำลองคณิตศาสตร์แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสารกึ่งตัวนำแบบผลึกซิลิกอน

A Mathematical Model of Crystalline Silicon Solar Module

เกษม ตรีภาค¹ จัตตุฤทธิ์ ทองปรอน¹ ชีระศักดิ์ สมศักดิ์² ยุทธนา กันทะพะเยา³ และ นพพร พัชรประทีป^{4*}

¹ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

128 ถนนห้วยแก้ว อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50300

²หน่วยวิจัยระบบพลังงานสะอาด วิทยาลัยเทคโนโลยีและสหวิทยาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

98 หมู่ 8 ตำบลป่าป้อ อำเภอดอยสะเก็ด จังหวัดเชียงใหม่ 50220

³สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

7/1 ถนนนนทบุรี 1 ตำบลสวนใหญ่ อำเภอเมือง จังหวัดนนทบุรี 11000

⁴สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย

99 ตำบลทรายขาว อำเภอพาน จังหวัดเชียงราย 57120

Kasem Treephak¹, Jutturit Thongporn¹, Dhirasak Somsak², Yuttana Kanthapayao³

and Nopporn Patcharaprakiti^{4*}

¹Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna

128 HuayKaew Road, Muang, Chiang Mai, Thailand, 50300

²Clean Energy System Research Unit, College of Integrated Science and Technology, Rajamangala University of Technology Lanna

98 Moo 8, Papon, Doisaket District, Chiang Mai, 50220

³Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi

7/1 Nonthaburi Road, Sounyai, Muang, Nonthaburi, 11000

⁴Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna Chiangrai

99 Saikhao, Phan, Chiangrai, 57120

*ผู้นิพนธ์ประสานงาน : nopporn@rmutl.ac.th เบอร์โทรศัพท์ 0-53-723-977

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้ได้พัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสารกึ่งตัวนำแบบซิลิกอนเพื่อใช้สำหรับงานวิเคราะห์ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ โดยการนำวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มาเขียนเป็น บล็อกไดอะแกรมด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink แล้วนำไปทดสอบหาค่าตัวแปรต่าง ๆ ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสารกึ่งตัวนำแบบซิลิกอนแบบผลึกเดี่ยวขนาด 30 วัตต์ และ 100 วัตต์ และแบบผลึกผสมขนาด 150 วัตต์ และ 280 วัตต์ รวมทั้งสิ้น 4 แผง โดยเปรียบเทียบกับ การวัดค่าตัวแปรต่าง ๆ ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยเครื่องวัด Solar analyzer ที่ค่าความเข้มของแสงอาทิตย์และอุณหภูมิที่แตกต่างกัน 5 ครั้งต่อแผง ผลการทดสอบพบว่า กราฟกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า และกราฟกำลังงานไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าที่ได้

จากแบบจำลองคณิตศาสตร์มีรูปร่างใกล้เคียงกับกราฟที่ได้จากเครื่องมือวัด ส่วนค่าตัวแปรอื่น ๆ นั้นเมื่อนำมาหาค่าผิดพลาดเฉลี่ยแล้วพบว่า กระแสสูงสุดเฉลี่ยของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกผสมขนาด 280 วัตต์ มีค่าผิดพลาดเฉลี่ยมากที่สุดเท่ากับ 7.93 เปอร์เซ็นต์ โดยส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 4.88 เปอร์เซ็นต์ และค่า Fill Factor (F.F.) ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 4 แผงมีค่าอยู่ระหว่าง 0.75 – 0.8 ทั้งที่วัดได้จากเครื่องมือวัดและจากแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้น

คำสำคัญ แบบจำลองคณิตศาสตร์ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสารกึ่งตัวนำแบบซิลิกอน กราฟกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า กราฟ กำลังงานไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

Abstract

This paper proposes a mathematical model of silicon photovoltaic for photovoltaic system analysis. The electrical equivalent circuit of solar module is model by MATLAB-Simulink block diagram. The Mathematical model is verified by adjusting the parameter of mono-crystalline 30Wp, 100Wp and poly crystalline 150Wp, 280Wp. The mathematical model was compared with the solar analyzer measurements at different intensity and temperature values in 5 samples. The results showed that I-V curve and P-V curve of mathematical model was similar to the curve obtained from solar analyzer measurement. As for the remaining variables, the maximum current of poly crystalline P.V. at 280Wp had maximum average error 7.93% at standard deviation 4.88% and Fill Factor (F.F.) of every P.V. was between 0.75-0.8 both the solar analyzer measurement and mathematical model.

Keywords: mathematical model, silicon semiconductor P.V. , I-V Curve, P-V Curve, electrical equivalent of P.V.

1. บทนำ

แผงเซลล์แสงอาทิตย์เป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่มีความสำคัญของระบบผลิตไฟฟ้าของพลังงาน ปัจจุบันมีการผลิต ค้นคว้าวิจัยเซลล์แสงอาทิตย์หลายชนิด เพื่อให้มีประสิทธิภาพสูง และมีราคาต้นทุนที่ถูกลง อย่างไรก็ตามเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดที่มีจำหน่ายและนิยมใช้กันมากในท้องตลาดเป็นชนิดสารกึ่งตัวนำแบบ Silicon ซึ่งแบ่งออกเป็นชนิดผลึกเดี่ยว Mono crystalline หรือและแบบหลายผลึก Poly crystalline และ Amorphous Silicon ซึ่งแม้จะมีราคาถูกแต่มีประสิทธิภาพต่ำและใช้พื้นที่ค่อนข้างมากในการติดตั้ง จึงมีการใช้งานน้อยกว่า 2 ชนิดแรก นอกเหนือจากประสิทธิภาพที่เกิดจากโครงสร้างทางกายภาพของสารกึ่งตัวนำแล้ว การควบคุมพารามิเตอร์และจุดทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้มีความเหมาะสม ก็จะมีผลต่อประสิทธิภาพกำลังและพลังงานที่จะส่งผลให้ได้กำลังไฟฟ้าและพลังงานไฟฟ้าสูงสุดจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตลอดเวลา ซึ่งการควบคุมดังกล่าวจำเป็นต้องทราบถึงคุณลักษณะและพฤติกรรมการตอบสนอง

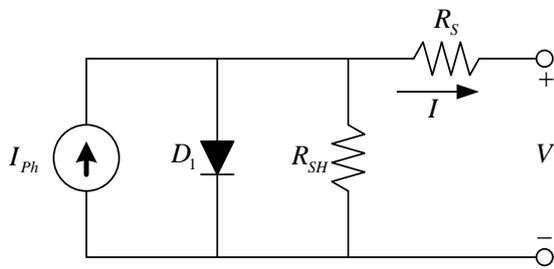
ต่อแสงอาทิตย์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งสามารถแสดงได้เป็นสูตร สมการความสัมพันธ์และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ [1-2] ซึ่งวิธีการจำลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีหลายวิธี เช่น แบบจำลองไดโอดเดี่ยว (single diode model), แบบจำลองไดโอดคู่ (double diode model), แบบจำลองสามไดโอด (three diode model) แบบจำลองการบังเงาบางส่วน (partial shading model) เป็นต้น [3-4] ซึ่งแต่ละแบบมีความยากง่ายต่างกัน แต่แบบที่นิยมใช้ในการจำลองมากที่สุดได้แก่ แบบจำลองไดโอดเดี่ยว (single diode model) ที่มีตัวต้านทานขนาน (shunt resistance) และตัวต้านทานอนุกรม (series resistance) สำหรับโปรแกรมที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองโปรแกรม MATLAB ได้รับความนิยม เนื่องจากสามารถเขียนได้ทั้งรูปแบบภาษา C และแบบ Block Diagram ซึ่งได้มีการนำมาใช้สร้างแบบจำลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในรูปแบบต่างๆ [5-8] และผลลัพธ์ของแบบจำลองสามารถเชื่อมโยงไปยังระบบควบคุม และระบบสั่งการจากอินพุต เอาท์พุต ภายนอกได้ [9-10] ดังนั้นในบทความนี้จึงได้พัฒนาแบบจำลองเซลล์



แสงอาทิตย์ด้วยแบบจำลองไดโอดเดี่ยว (single diode model) โดยใช้โปรแกรม MATLAB ในการพัฒนาแบบจำลอง

2. วงจรสมมูลของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ สามารถใช้วงจรไฟฟ้าในการแสดงโครงสร้างและส่วนประกอบของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ แบบจำลอง Single Diode Model เป็นแบบจำลองอย่างง่ายที่สามารถอธิบายให้เข้าใจคุณลักษณะและพารามิเตอร์ของระบบได้ ซึ่งประกอบด้วยแหล่งจ่ายกระแส ไดโอด ความต้านทานขนาน (R_{sh}) และความต้านทานอนุกรม (R_s) ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 วงจรสมมูล Single Diode ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด Silicon

วงจรสมมูลของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในรูปที่ 1 สามารถเขียนเป็นสมการคณิตศาสตร์ได้ดังสมการที่ 1

$$I = I_{PH} - I_S \left[e^{\frac{q(V+I.R_s)}{N_s.k.T.A}} - 1 \right] - \frac{V + I.R_s}{R_{SH}} \quad (1)$$

จากสมการที่ 1 ตัวแปร I คือกระแสที่จ่ายออกมาจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ I_{PH} คือกระแสที่เกิดจากปฏิกิริยาของแสงอาทิตย์ I_S คือกระแสไบอัสอิ่มตัวย้อนกลับของไดโอด q คือประจุอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ 1.602×10^{-19} คูอมป์ k คือค่าคงที่ของ Boltzman มีค่าเท่ากับ $1.3806504 \times 10^{-23}$ จูลต่อองศาเคลวิน T คืออุณหภูมิที่รอยต่อขณะทำงานของเซลล์ V คือแรงดันที่ตกคร่อมแผงในขณะที่จ่ายออกมา R_s คือค่าความต้านทานอนุกรมของเซลล์ R_{SH} คือค่าความต้านทานขนานของเซลล์ N_s คือจำนวนเซลล์ที่ต่ออนุกรมในแผงเซลล์แสงอาทิตย์ A คือค่า Ideal factor ที่มีค่าดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่า Ideal factor ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

Technology	N	Technology	N
Si-mono	1.2	a-Si:H triple	5
Si-poly	1.3	CdTe	1.5
a-Si:H	1.8	CIS	1.5
a-Si:H tandem	3.3	AsGa	1.3

กระแสที่เกิดจากปฏิกิริยาของแสงอาทิตย์นั้น สามารถคำนวณได้โดยใช้สมการที่ 2

$$I_{PH} = \lambda \cdot (I_{SC} + K_L \cdot (T - T_r)) \quad (2)$$

โดย λ คือค่าความเข้มแสงอาทิตย์มีหน่วยเป็นวัตต์ต่อตารางเมตร I_{SC} คือกระแสของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขณะลัดวงจรที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสและความเข้มแสงอาทิตย์ 1000 วัตต์ต่อตารางเมตร K_L คือสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของกระแสลัดวงจรมีหน่วยเป็นแอมป์ต่อองศาเซลเซียส T_r คืออุณหภูมิอ้างอิงของเซลล์มีหน่วยเป็นเคลวิน ส่วนกระแสไบอัสอิ่มตัวย้อนกลับของไดโอดนั้นสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3

$$I_S = I_{RS} \cdot \left(\frac{T}{T_r} \right)^3 \cdot e^{-\left[q \cdot E_G \cdot \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T} \right) \right] / k.A} \quad (3)$$

E_G คือ band-gap energy of the semiconductor used in the cell กรณีของสารกึ่งตัวนำชนิดซิลิกอนมีค่าคงที่เท่ากับ 1.1 ส่วน I_{RS} คือค่า Reverse saturation current of diode คำนวณได้จากสมการที่ 4

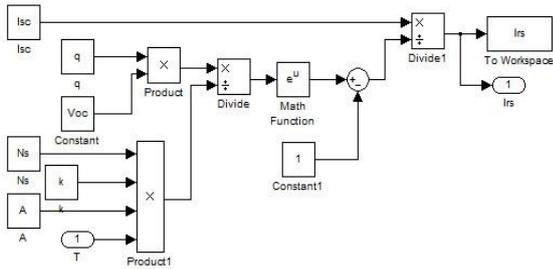
$$I_{RS} = \frac{I_{SC}}{e^{\left[\frac{q.V_{OC}}{N_s.k.A.T} \right] - 1}} \quad (4)$$

V_{OC} คือแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ในขณะที่เปิดวงจรที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสและความเข้มแสงอาทิตย์ 1000 วัตต์ต่อตารางเมตร

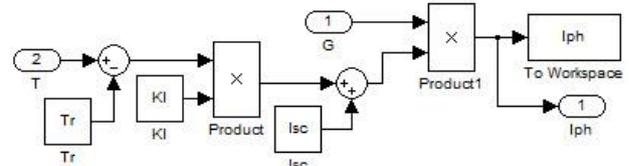
3. แบบจำลองคณิตศาสตร์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

จากสมการคณิตศาสตร์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถนำมาสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอนได้ โดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink สร้างบล็อกไดอะแกรมของสมการในวงจรสมมูลของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ 1 ถึงสมการที่ 4 ดังรูปที่ 2 ถึงรูปที่ 5 ส่วนรูปที่ 6 คือแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้จำลองกราฟกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า และกราฟกำลัง

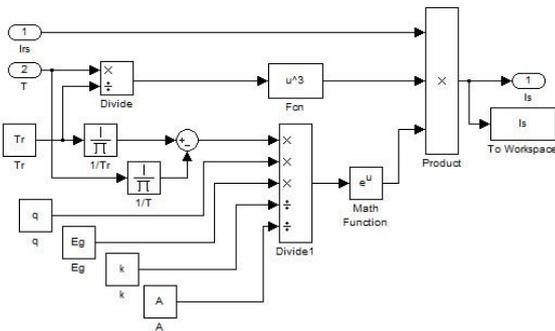
งานไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยใช้โปรแกรมจากบล็อกไดอะแกรมของ MATLAB/Simulink แบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ออกแบบนี้ เมื่อนำไปวิเคราะห์ต้องป้อนค่าตัวแปรต่าง ๆ ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต้องการวิเคราะห์ ใน M-File ของโปรแกรม MATLAB ก่อน รูปที่ 7 แสดงตัวอย่างของ MATLAB/M-File ที่ป้อนตัวแปรต่าง ๆ ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด Poly crystalline ที่ต้องให้เก็บค่าตัวแปรต่าง ๆ ก่อนเข้าโปรแกรม MATLAB/Simulink



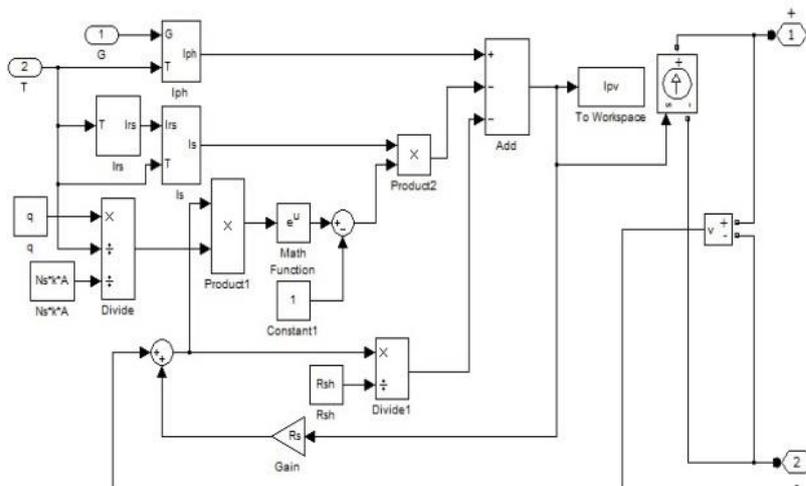
รูปที่ 2 MATLAB/Simulink ของสมการที่ 7 ; I_S



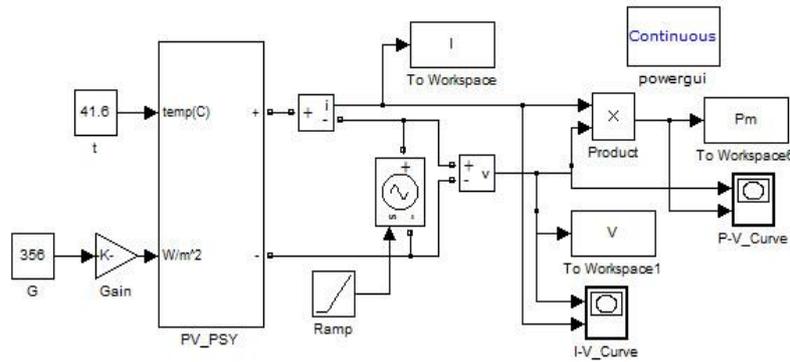
รูปที่ 4 MATLAB/Simulink ของสมการที่ 2 ; I_{PH}



รูปที่ 3 MATLAB/Simulink ของสมการที่ 3 ; I_S



รูปที่ 5 MATLAB/Simulink ของสมการที่ 1 ; I



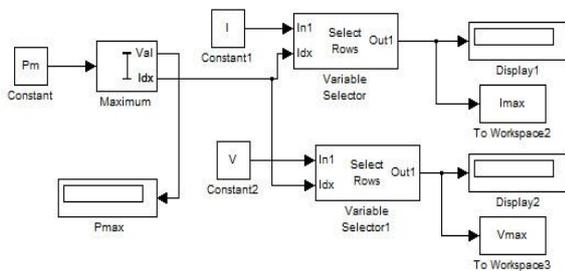
รูปที่ 6 แบบจำลองคณิตศาสตร์แผงเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับเขียน I-V Curve และ P-V Curve

```

1 % DATA OF PV
2 clear;
3 q = 1.6e-19 ;
4 k = 1.38e-23;
5 Voc = 44.8 ;
6 Isc = 8.33;
7 Ns = 36;
8 A = 1.3;
9 Ir = 298;
10 Eg = 1.11;
11 Kl = 3.7e-3;
12 Rs = 0.52;
13 Rsh = 10000;
14 G = 1;
15 t1 = 25;
16 I = t1+273;
17 r=0;
    
```

รูปที่ 7 ตัวอย่าง M-File ของโปรแกรม MATLAB

แบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ออกแบบนี้สามารถวิเคราะห์แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสารกึ่งตัวนำแบบซิลิกอนชนิด Mono crystalline และ Poly crystalline และนอกจากนั้นทีมงานวิจัยยังได้สร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์เพื่อให้สามารถแสดงค่ากำลังงานสูงสุด กระแสสูงสุดและแรงดันสูงสุด เมื่อทดลองวัดค่าที่ความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิที่แตกต่างกัน ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 แบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับแสดงค่า P_{MAX} , I_{MAX} และ V_{MAX}

4. การทดสอบ

การทดสอบแบบจำลองคณิตศาสตร์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้นนั้นทดสอบโดยการนำแผงเซลล์แสงอาทิตย์ใช้ในการทดสอบ ซึ่งประกอบด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด Mono crystalline จำนวน 2 แผง และชนิด Poly crystalline จำนวน 2 แผง รายละเอียดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 4 แผงแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ตัวแปรของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ทดสอบ

Parameter	Mono crystalline		Poly crystalline	
Pmax (Wp)	30	100	150	280
Vmax (V)	17.2	18	18.5	35.2
Imax (A)	1.74	5.55	8.1	7.95
Voc (V)	21.8	21.6	21.5	44.8
Isc (A)	1.91	6.11	8.91	8.33
Ns	36	36	36	72
A	1.2	1.2	1.3	1.3
Rs (Ω)	1.5m	77m	50m	52m
Rsh (Ω)	8.5k	1k	9k	10k

ค่าความต้านทานที่ต่ออนุกรมและขนาน ที่ระบุไว้ในตารางที่ 2 นั้น ไม่ได้ระบุมาที่ป้ายบอกคุณลักษณะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แต่ทีมงานวิจัยได้กำหนดค่าด้วยวิธีการสุ่มค่าความต้านทานทั้งสอง ที่ทำให้ I-V Curve ที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์มีรูปร่างใกล้เคียงกับกราฟมาตรฐานที่ระบุมาตามข้อมูลของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยแบบจำลองคณิตศาสตร์ได้กำหนดค่าความเข้มแสงอาทิตย์ที่ 1000 วัตต์ต่อตารางเมตร

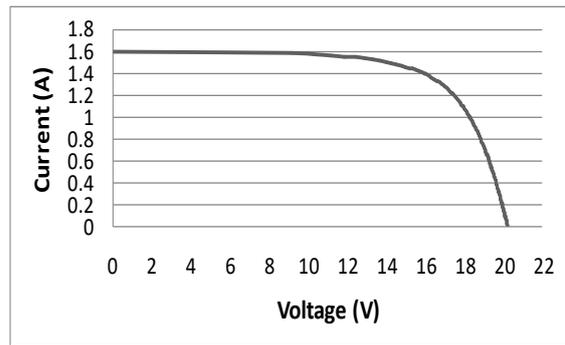
และอุณหภูมิได้แผงเซลล์แสงอาทิตย์เท่ากับ 25 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นค่าตัวแปรตามมาตรฐานการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และยังได้ทำการตรวจสอบตัวแปรต่าง ๆ ที่ระบุไว้ที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์เช่น กำลังงานไฟฟ้าสูงสุด (P_{MAX}) แรงดันไฟฟ้าสูงสุด (V_{MAX}) และกระแสไฟฟ้าสูงสุด (I_{MAX}) ให้มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้ในแบบจำลองคณิตศาสตร์มากที่สุด ส่วนการทดสอบนั้นเริ่มจากการนำแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 4 แผงวัดค่า I-V Curve, P-V Curve, P_{MAX} , V_{MAX} , I_{MAX} , V_{OC} , และ I_{SC} ด้วยเครื่องวัด Solar Analyzer ยี่ห้อ PROVA รุ่น 210 วัดค่าความเข้มแสงอาทิตย์ด้วยเครื่องวัดค่าความเข้มแสงอาทิตย์ ยี่ห้อ Seaward รุ่น 200 และวัดอุณหภูมิได้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยเครื่องวัดอุณหภูมิแบบใช้แสงอินฟราเรด โดยกำหนดให้วัดค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ค่าความเข้มแสงที่แตกต่างกันไม่ต่ำกว่า 5 ค่าของแต่ละแผงเซลล์ฯ เครื่องมือวัดต่าง ๆ ดังรูปที่ 9 จากนั้นนำค่าตัวแปรที่วัดได้เปรียบเทียบกับแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นจากโปรแกรม MATLAB/Simulink



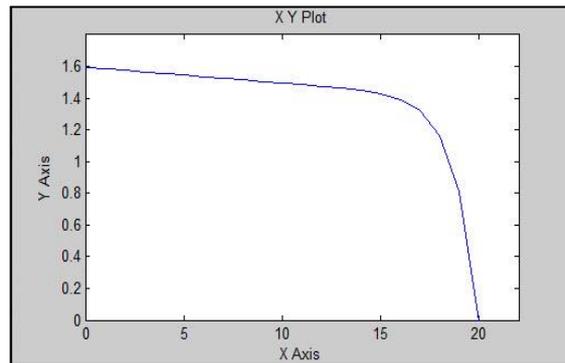
รูปที่ 9 เครื่องมือวัดค่าตัวแปรต่าง ๆ

5. ผลการทดสอบ

I-V Curve แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด Mono crystalline ขนาด 30 Wp เมื่อวัดที่ค่าความเข้มแสงอาทิตย์ 820 วัตต์ต่อตารางเมตร และอุณหภูมิได้แผงเท่ากับ 35 องศาเซลเซียส แสดงดังรูปที่ 10 ส่วนที่แผง Mono crystalline ขนาด 100 Wp ที่ค่าความเข้มแสงอาทิตย์ 528 วัตต์ต่อตารางเมตร และอุณหภูมิได้แผงเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 11

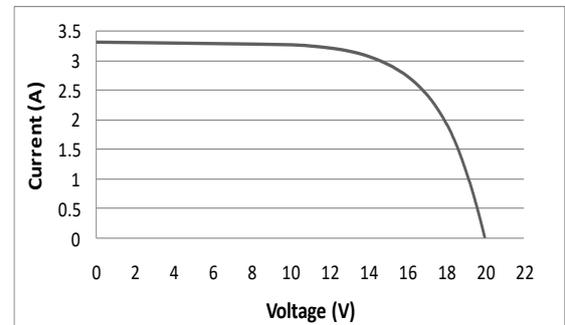


ก. จากเครื่องวัด Solar Analyzer

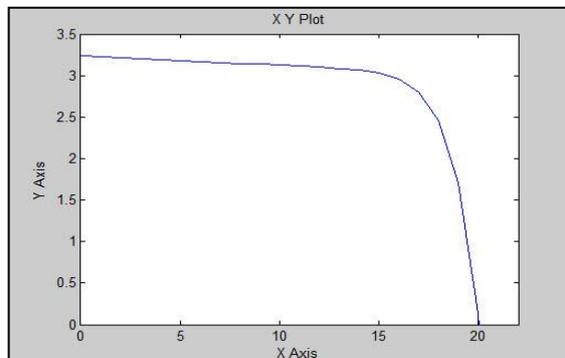


ข. จาก MATLAB/Simulink

รูปที่ 10 I-V Curve แผง Mono crystalline ขนาด 80 Wp ที่ 820 W/m² และ 35°C



ก. จากเครื่องวัด Solar Analyzer



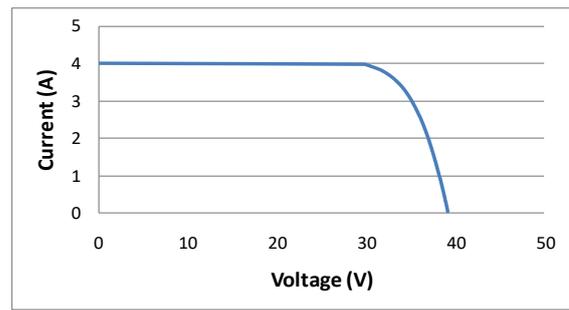
ข. จาก MATLAB/Simulink

รูปที่ 11 I-V Curve แผง Mono crystalline ขนาด 100 Wp ที่ 528 W/m² และ 30°C

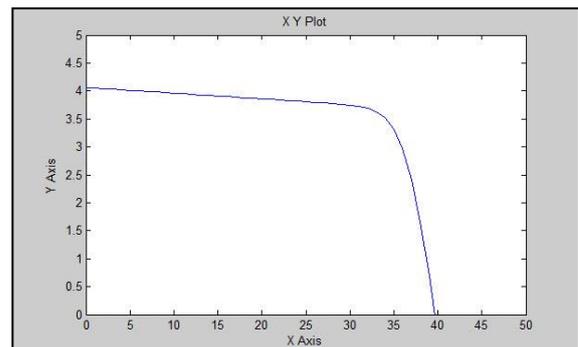


I-V Curve แผง Poly crystalline ขนาด 150 Wp ที่ความเข้มแสงอาทิตย์ 589 วัตต์ต่อตารางเมตร อุณหภูมิได้แผง 42 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 12 และ I-V Curve แผง Poly crystalline ขนาด 280 Wp ที่ความเข้มแสงอาทิตย์ 482 วัตต์ต่อตารางเมตร อุณหภูมิได้แผง 51.5 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 13

ส่วนผลการทดสอบ P-V Curve ของแผง Mono crystalline ขนาด 30 Wp ที่ค่าความเข้มแสงอาทิตย์ 621 วัตต์ต่อตารางเมตร และอุณหภูมิได้แผง 33 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 14 และที่แผง Mono crystalline ขนาด 100 Wp ที่ค่าความเข้มแสงอาทิตย์ 689 วัตต์ต่อตารางเมตร และอุณหภูมิได้แผง 31 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 15

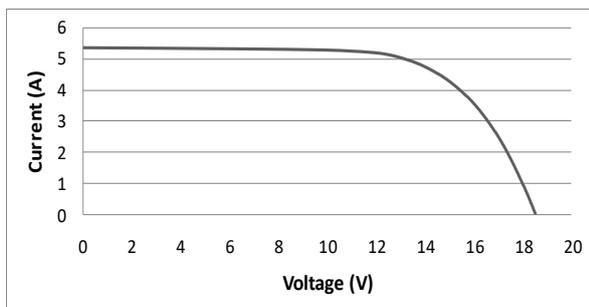


ก. จากเครื่องวัด Solar Analyzer

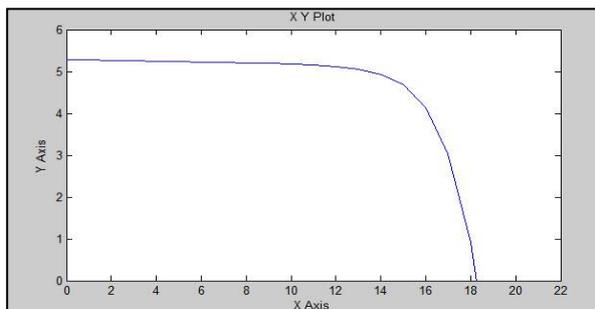


ข. จาก MATLAB/Simulink

รูปที่ 13 I-V Curve แผง Poly crystalline ขนาด 280 Wp ที่ 482 W/m² และ 51.5°C

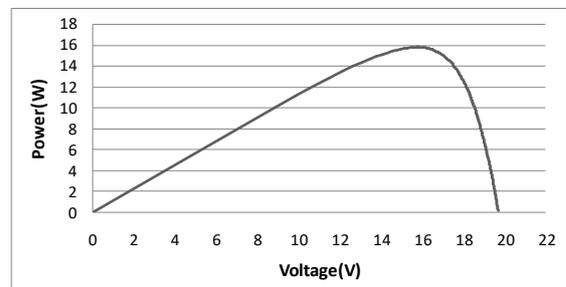


ก. จากเครื่องวัด Solar Analyzer

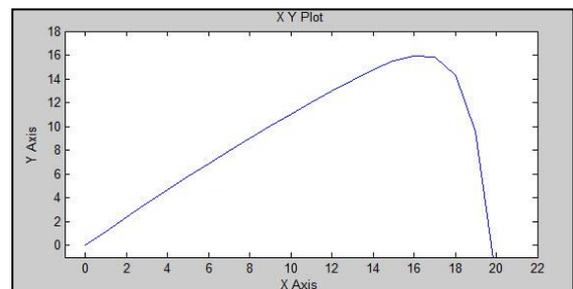


ข. จาก MATLAB/Simulink

รูปที่ 12 I-V Curve แผง Poly crystalline ขนาด 150 Wp ที่ 589 W/m² และ 42°C

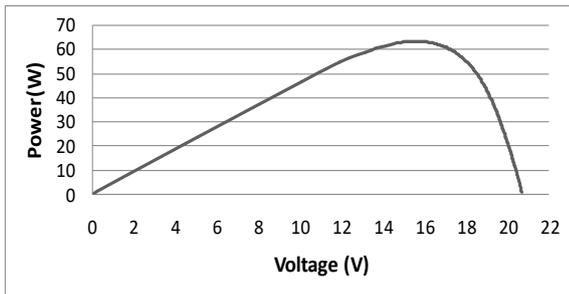


ก. จากเครื่องวัด Solar Analyzer

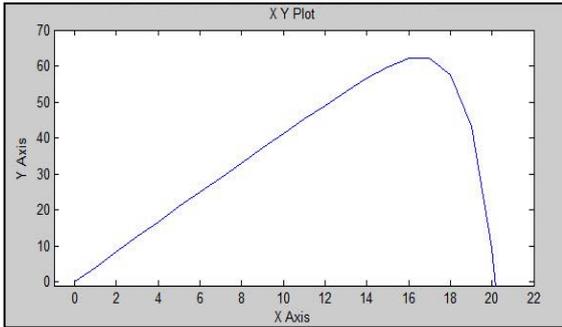


ข. จาก MATLAB/Simulink

รูปที่ 14 P-V Curve แผง Mono crystalline ขนาด 30 Wp ที่ 621 W/m² และ 33°C

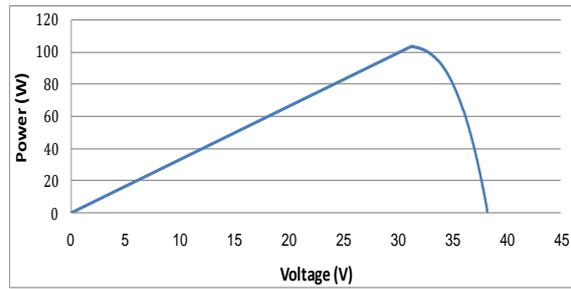


ก. จากเครื่องวัด Solar Analyzer

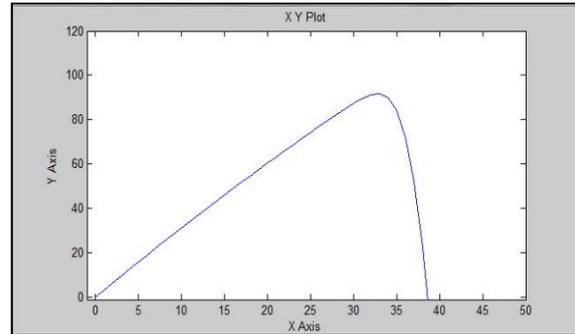


ข. จาก MATLAB/Simulink

รูปที่ 15 P-V Curve แผง Mono crystalline ขนาด 30 W ที่ 689 W/m^2 และ 31°C

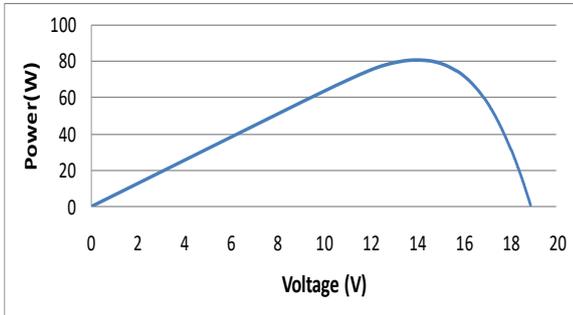


ก. จากเครื่องวัด Solar Analyzer

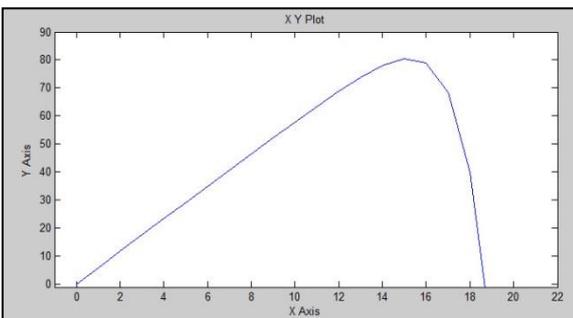


ข. จาก MATLAB/Simulink

รูปที่ 17 P-V Curve แผง Poly crystalline ขนาด 280 Wp ที่ 382 W/m^2 และ 56°C



ก. จากเครื่องวัด Solar Analyzer



ข. จาก MATLAB/Simulink

รูปที่ 16 P-V Curve แผง Poly crystalline ขนาด 150 Wp ที่ 657 W/m^2 และ 40°C

ขณะที่แผง Poly crystalline ขนาด 150 Wp ที่ค่าความเข้มแสงอาทิตย์ 657 วัตต์ต่อตารางเมตร และอุณหภูมิได้แผง 40 องศาเซลเซียสวัด P-V Curve ได้ ดังรูปที่ 16 และที่แผง Poly crystalline ขนาด 280 Wp ที่ค่าความเข้มแสงอาทิตย์ 382 วัตต์ต่อตารางเมตร และอุณหภูมิได้แผง 56 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 17 เมื่อนำค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุด (V_{MAX}) กระแสไฟฟ้าสูงสุด (I_{MAX}) กำลังงานไฟฟ้าสูงสุด (P_{MAX}) แรงดันไฟฟ้าในขณะเปิดวงจร (V_{OC}) และกระแสไฟฟ้าในขณะลัดวงจร (I_{SC}) ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 4 แผง ที่วัดได้จากเครื่องวัด Solar Analyzer เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ MATLAB/Simulink ที่สร้างขึ้นดังรูปที่ 8 โดยคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดเฉลี่ยของแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นเทียบกับการวัดค่าตัวแปรต่าง ๆ ด้วยเครื่องวัด Solar Analyzer จำนวน 5 ครั้ง สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 3



ตารางที่ 3 เปรอ์เซ็นต์ความผิดพลาดเฉลี่ยของแบบจำลองคณิตศาสตร์ MATLAB/Simulink

%Error (%)	Mono crystalline				Poly crystalline			
	30 Wp		100Wp		150 Wp		280 Wp	
	Mean	S.D.	Mean	S.D.	Mean	S.D.	Mean	S.D.
P_{MAX}	6.58	5.15	4.35	4.67	5.11	5.30	5.23	5.29
V_{MAX}	4.12	1.60	2.90	1.56	3.25	1.70	3.70	1.75
I_{MAX}	6.54	4.50	5.64	4.20	6.40	4.50	7.93	4.88
V_{OC}	1.50	2.08	1.65	2.05	1.54	1.95	1.73	2.12
I_{SC}	1.24	1.20	1.52	1.10	1.15	1.27	1.50	1.33

ตารางที่ 4 ค่า Fill Factor ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทดสอบ

Fill Factor (F.F.)	Mono crystalline				Poly crystalline			
	30 Wp		100Wp		150 Wp		280 Wp	
	Mean	S.D.	Mean	S.D.	Mean	S.D.	Mean	S.D.
Solar Analyzer	0.79	0.03	0.78	0.04	0.79	0.03	0.8	0.04
MATLAB/Simulink	0.75	0.01	0.76	0.01	0.77	0.01	0.75	0.01

เมื่อนำค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุด (V_{MAX}) กระแสไฟฟ้าสูงสุด (I_{MAX}) กำลังงานไฟฟ้าสูงสุด (P_{MAX}) แรงดันไฟฟ้าในขณะเปิดวงจร (V_{OC}) และกระแสไฟฟ้าในขณะลัดวงจร (I_{SC}) ที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องวัด Solar Analyzer และที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ MATLAB/Simulink คำนวณค่า Fill Factor เฉลี่ยของแต่ละแผง และนำมาเปรียบเทียบกัน ดังตารางที่ 4

6.สรุปและวิจารณ์

แบบจำลองคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นนั้น เมื่อนำมาทดสอบวัดค่ากระแสไฟฟ้าโดยป้อนค่าแรงดันไฟฟ้าตามที่กำหนดไว้ และทำการเขียน กราฟกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า (I-V curve) และกราฟกำลังงานไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า (P-V curve) เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับเครื่องวัด Solar Analyzer ซึ่งใช้หลักการของ อิเล็กทรอนิกส์ไหลด์ แล้ววัดค่าแรงดันไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้าเก็บไว้ในหน่วยความจำซึ่งสามารถนำมาเขียนเป็นกราฟกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า (I-V curve) และกราฟกำลังงานไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า (P-V curve) เช่นกัน ซึ่งพบว่ากราฟที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นนั้น ไม่ว่าจะเป็นกราฟกระแสไฟฟ้าและ

แรงดันไฟฟ้า (I-V curve) หรือกราฟกำลังงานไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า (P-V curve) ต่างก็มีรูปร่างที่ใกล้เคียงกับกราฟที่ได้จากเครื่องวัด Solar Analyzer นอกจากนั้นเมื่อพิจารณา ค่า Fill Factor (F.F.) ซึ่งเป็นตัวแปรที่บอกถึงความคมของกราฟกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า (I-V curve) โดยคำนวณที่จากตัวแปรที่ได้จากการทดสอบของทุก ๆ แผงแล้วนำมาคำนวณค่าเฉลี่ยของแต่ละแผงดังตารางที่ 4 พบว่า ค่า F.F เฉลี่ยที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของทุก ๆ แผง มีค่าใกล้เคียงกับค่า F.F. เฉลี่ยที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องวัด Solar Analyzer และเมื่อนำค่า F.F เฉลี่ยทั้งสองมาคำนวณค่า เปรอ์เซ็นต์ความผิดพลาดแล้วพบว่า แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีค่าความผิดพลาดมากที่สุดคือแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด Poly crystalline ขนาด 280 วัตต์ โดยมีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดเท่ากับ 6.25 เปรอ์เซ็นต์ ขณะเดียวกันเมื่อพิจารณาเปอร์เซ็นต์ค่าผิดพลาดเฉลี่ยของตัวแปรต่างๆ ตามตารางที่ 3 พบว่ามีเปอร์เซ็นต์ค่าผิดพลาดเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 7.93 เปรอ์เซ็นต์ที่ค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด Poly crystalline ขนาด 280 วัตต์ โดยค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นอาจเกิดขึ้นได้จากค่าตัวต้านทานอนุกรม (R_s) 1 และค่าความต้านทานขนาน (R_{sh}) ซึ่งไม่ได้ระบุไว้ในคุณลักษณะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ดังนั้นการสุ่มด้วยวิธีการนำ I-V Curve มาตราฐานมาเปรียบเทียบกับแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นจึงมีโอกาที่จะค่าความต้านทานทั้งสองตัวนี้มีความคลาดเคลื่อนจากค่าความต้านทานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จริง ๆ ดังนั้นเมื่อต้องการให้แบบจำลองคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นมีค่าความผิดพลาดน้อยลง จึงต้องทำการทดสอบเพื่อหาค่าความต้านทานที่ต่ออนุกรมและที่ต่อแบบขนานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทุก ๆ แผงก่อนแล้วนำค่าความต้านทานที่ได้มาใช้งานในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้น ซึ่งแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นด้วยวิธีการตามบทความนี้ สามารถนำมาใช้อธิบายพฤติกรรมของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดกึ่งตัวนำแบบซิลิกอน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิได้ โดยมีค่าความผิดพลาดในการใช้งานไม่เกิน 8 เปรอ์เซ็นต์

สำหรับแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นนี้จะใช้ได้กับเฉพาะแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด Mono Crystalline และ Poly Crystalline แต่ยังไม่สามารถใช้วิเคราะห์แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด Amorphous Thin film ได้ เนื่องจากแผงดังกล่าวไม่สามารถระบุจำนวนเซลล์ของแผงชนิดนี้ได้ แต่อย่างไรก็ตามสามารถใช้หลักการเดียวกันนี้พัฒนาแบบจำลองได้ โดยใช้รูปแบบสมการและแนวทางในการจำลองของเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละชนิดในการสร้างแบบจำลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอื่น ๆ ต่อไปได้

7. กิตติกรรมประกาศ

ทางคณะผู้วิจัยขอขอบคุณหน่วยวิจัยระบบพลังงานสะอาด มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้ความสะดวกในการใช้เครื่องมือในการทำงานวิจัยและมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ลำปาง ที่อำนวยความสะดวกในการดำเนินการทดลอง

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] J. A. Gow, C. D. Manning “Development of a photovoltaic array model for use in power electronics simulation studies,” IEE Proceedings on Electric Power Applications, vol. 146, no. 2, pp. 193-200, March 1999.
- [2] T. Salmi, M. Bouzguenda, A. Gastli and A. Masmoudi “MATLAB/Simulink Based Modeling of Solar Photovoltaic Cell” International Journal of Renewable Energy Research, Vol.2 No.2 2012.
- [3] M.Azzouzi, D.Popescu and M. Bouchahdane, “Modeling of Electrical Characteristic of Photovoltaic Cell Considering Single-Diode Model”, Journal of Clean Energy Technologies, Vol. 4, No. 6, November 2016, pp. 414-419.
- [4] B. Zaidi, I.Sanouane, C.Shekhar, “Simulation of single-diode Equivalent model of Polycrystalline Silicon Solar Cells”, International Journal of Materials Science and Applications, 31 August 2017.
- [5] H. Bellia, R. Youcef, Moulay Fatima, “A Detailed modeling of photovoltaic module using MATLAB”, NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics, (2014), Vol. 3, pp. 53-61.
- [6] N. A.Zanial, A.man, A.Razaian Yusoft, “Modelling of Photovoltaic Module using MATLAB Simulink, Material Science and Engineering, Vol 114., 2016
- [7] H.Rezk, E.Hasaneen, “A new MATLAB/Simulink model of triple-junction solar cell and MPPT based on artificial neural networks for photovoltaic energy systems, Ain Shams Engineering Journal, 2015, Vol.6, pp. 873-881.
- [8] X.Hieu Nguyen, M.P. Nguyen, “Mathematical modeling of photovoltaic cell/module/arrays with tags in MATLAB/Simulink, Environmental Systems Research, 2015, 4-24.
- [9] S.Said, A.Massoud, M.Benammar and S.Ahmed “A Simulink-Based Photovoltaic Array Model Employing SimPowerSystem Toolbox” Journal of Energy and Power Engineering 6, December 2012.
- [10] G. Walker, "Evaluating MPPT converter topologies using a MATLAB PV model," Journal of Electrical & Electronics Engineering, Australia, IEA August, vol.21, No. 1, 2001, pp.49-56.