

# การหาค่าพารามิเตอร์วงจรสมมูลแผงเซลล์แสงอาทิตย์

## แบบอะมอร์ฟิสซิลิกอนโดยใช้การหาค่าเหมาะสม

## แบบกลุ่มอนุภาคร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียม

### Parameters Determination of a-Si PV Module Equivalent

### Circuit Using Particle Swarm Optimization

### Coupled with Artificial Neural Network

หทัยชนก ทวีชัย      ปุณย์ภัทร ภูมิภาค

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

#### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวิธีการหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟิสซิลิกอนแบบสองไดโอดโดยใช้เทคนิคการเคลื่อนตัวของอนุภาคที่เหมาะสม และสามารถกำหนดขอบเขตของตัวแปรด้วยเทคนิคโครงข่ายประสาทเทียม โดยใช้ข้อมูลจากผู้ผลิต ได้แก่ กำลังไฟฟ้าสูงสุด แรงดันเปิดวงจร กระแสลัดวงจร แรงดันและกระแสที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่สภาวะเงื่อนไขการทดสอบมาตรฐาน สำหรับค่าพารามิเตอร์จากการประมาณค่าด้วยวิธีนี้สามารถประเมินผลโดยการเปรียบเทียบสมรรถนะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ระหว่างค่าที่ได้จากการหาพารามิเตอร์วงจรสมมูลแบบสองไดโอดกับการทดสอบที่สภาวะการใช้งานจริงซึ่งผลการเปรียบเทียบพบว่าค่าพารามิเตอร์จากต้นแบบมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดสอบและจากข้อมูลผู้ผลิต

**คำสำคัญ :** เซลล์แสงอาทิตย์, วงจรสมมูล, การเคลื่อนตัวของอนุภาคที่เหมาะสม, โครงข่ายประสาทเทียม

#### Abstract

This paper proposes a method for parameters determination of amorphous silicon photovoltaic module equivalent circuit based on double diode model using particle swarm optimization (PSO). This paper presents the use of artificial neural network in order to evaluate the boundary of photovoltaic module optimal parameters using the manufacturer data i.e. maximum power, open circuit voltage, short circuit current, voltage and current which generated the maximum power under standard test condition (STC). In this proposed technique, the optimal parameters can be evaluated by comparing the performance of photovoltaic module obtained from the estimated parameters and the test data at operating conditions. The results indicate that the agreement between the optimal parameters and the parameters achieved from the test and manufacturer data validates the proposed method.

**Keywords :** photovoltaic, equivalent circuit, particle swarm optimization, artificial neural network

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1. บทนำ

เซลล์แสงอาทิตย์เป็นอุปกรณ์ทางไฟฟ้าซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าด้วยกระบวนการโฟโตโวลตาอิก (photovoltaic) เซลล์แสงอาทิตย์แบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ เซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึก (crystalline solar cells) กับ เซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบาง (thin film solar cells) โดยที่เซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึก มีประสิทธิภาพต่ำกว่าเซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบาง แต่เซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบางมีข้อดี คือราคาถูกกว่า เนื่องจากใช้วัสดุในการผลิตน้อยและขั้นตอนกระบวนการผลิตลดลง [1] เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้จะมีลักษณะบางมาก มีความยืดหยุ่นตัว สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบาง ที่สำคัญในการค้าได้แก่ อะมอร์ฟัสซิลิคอน (a-Si) และ แคดเมียมเทลลูไรด์/แคดเมียมซัลไฟด์ (CuTe/CuS) เป็นต้น

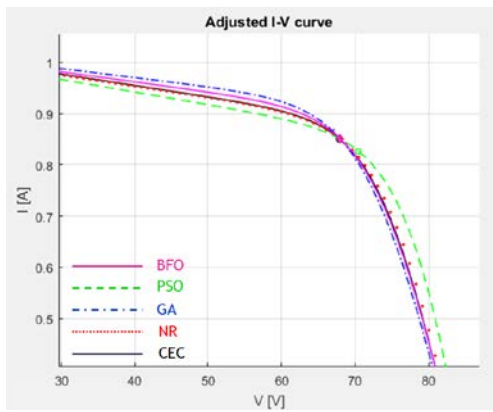
การประเมินสมรรถนะในการผลิตพลังงานไฟฟ้าของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ โดยทั่วไปนิยมใช้วงจรสมมูลเซลล์แสงอาทิตย์แบบหนึ่งไดโอดสำหรับแสดงคุณลักษณะทางไฟฟ้าในสภาวะการทำงานที่มีความเข้มแสงปกติ [2-4] ซึ่งเป็นผลมาจากปรากฏการณ์แพร่ (diffusion) ของพาหะภายในเซลล์แสงอาทิตย์ในสภาวะความเข้มแสงมากเท่านั้น [5] อย่างไรก็ตามกระบวนการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์โดยทั่วไปจะมี 2 ปรากฏการณ์ คือ ปรากฏการณ์แพร่ และ ปรากฏการณ์การรวมตัว (recombination) ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาวงจรสมมูลแบบสองไดโอดโดยการเพิ่มไดโอดต่อขนานเข้ากับวงจรสมมูลแบบหนึ่งไดโอด สำหรับไดโอดตัวที่หนึ่งจะจำลองปรากฏการณ์แพร่ของพาหะข้างน้อย (minority carrier) ที่บริเวณเขตปลอดพาหะ ( $D_1$ ) และไดโอดตัวที่สอง ( $D_2$ ) แสดงปรากฏการณ์รวมตัวในเขตปลอดประจุของรอยต่อพีเอ็นที่เกิดขึ้นในสภาวะความเข้มแสงน้อย [4-5]

จากวงจรสมมูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่กล่าวมาข้างต้นจะพบว่ามีการใช้พารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าซึ่งทางผู้ผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ไม่ได้ให้ข้อมูลดังกล่าวมา สำหรับข้อมูลที่ผู้ผลิตให้มาจะประกอบด้วยคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ได้แก่ แรงดันเปิดวงจร กระแสลัดวงจร

กำลังไฟฟ้าสูงสุด แรงดันและกระแสที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด และค่าสัมประสิทธิ์กระแสและแรงดัน เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ซึ่งคุณลักษณะทางไฟฟ้าดังกล่าวจะมีความสัมพันธ์กับค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลเซลล์แสงอาทิตย์ ดังนั้นจึงได้มีนักวิจัยนำเสนอการหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลเซลล์แสงอาทิตย์ ได้แก่ การหาโดยใช้วิธีการทำซ้ำ (iterative method) [6-8] ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้งาน นอกจากนั้นยังมีการใช้เทคนิคการหาค่าเหมาะสม (optimization technique) แบบต่างๆ เช่น วิธีการขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (genetic algorithms) [9] วิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบกลุ่มอนุภาค (particle swarm optimization) [10] เทคนิคการหาค่าเหมาะสมด้วยการค้นหาแบบแบคทีเรีย (Bacterial Foraging Optimization) [11] เป็นต้น การศึกษาโดยใช้ฐานข้อมูล California Energy Commission (CEC) วิเคราะห์คุณลักษณะทางไฟฟ้าเปรียบเทียบกับวิธีการที่นำเสนอข้างต้น ได้แก่ วิธีการทำซ้ำแบบนิวตัน-ราฟสัน (NR) วิธีการขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (GA) วิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบกลุ่มอนุภาค (PSO) และการหาค่าเหมาะสมด้วยการค้นหาแบบแบคทีเรีย (BFO) ผลการศึกษาแสดงดังรูปที่ 1

พิจารณากราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน จากรูปที่ 1 พบว่าค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลที่ได้จากวิธีการทำซ้ำแบบนิวตัน-ราฟสัน แสดงคุณลักษณะทางไฟฟ้าได้ใกล้เคียงกับผลการทดสอบจากฐานข้อมูลของ CEC ในขณะที่เทคนิคการหาค่าเหมาะสม [9-11] ยังไม่สามารถแสดงคุณลักษณะทางไฟฟ้าได้สอดคล้องกับผลการทดสอบ ดังนั้นบทความนี้จะนำเสนอวิธีการหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลแบบสองไดโอดสำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์อะมอร์ฟัสซิลิคอนแบบฟิล์มบาง โดยใช้เทคนิคการหาค่าเหมาะสมแบบกลุ่มอนุภาคร่วมกับการกำหนดขอบเขตของค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีโครงชายประสาทเทียม และทำการประเมินผลวิธีการที่นำเสนอโดยเปรียบเทียบสมรรถนะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ระหว่างค่าที่ได้จากวงจรสมมูลกับการทดสอบที่สภาวะการใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันที่ได้จากการหาค่าพารามิเตอร์โดยใช้เทคนิควิธีการทำซ้ำ (NR) และ เทคนิคการหาค่าเหมาะสม (GA, PSO, BFO) เปรียบเทียบกับฐานข้อมูล CEC

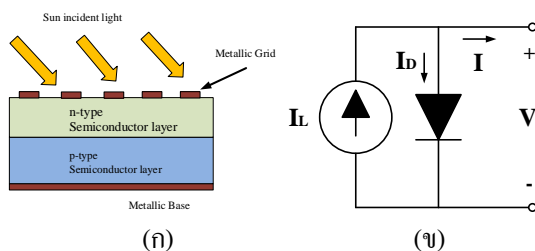
2. วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์ มีโครงสร้างคล้ายกับ ไดโอด เมื่อมีแสงมาตกกระทบสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ แสดงดังรูปที่ 2 (ก) สำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (photovoltaic module) 1 แผง จะมีเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่ออนุกรมกันจำนวน  $N_s$  เซลล์ เมื่อจัดให้อยู่ในรูปแบบของวงจรสมมูลอุดมคติ แสดงดังรูปที่ 2 (ข) ประกอบด้วย แหล่งจ่ายกระแสที่เกิดขึ้นเนื่องจากแสงตกกระทบ (light current :  $I_L$ ) ขนานกับกระแสที่ไหลผ่านไดโอด (diode current :  $I_D$ ) โดยที่แรงดันที่ขั้วของเซลล์แสงอาทิตย์ ( $V$ ) และกระแสไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์จ่ายให้กับภาระไฟฟ้า ( $I$ )

สำหรับกระแสที่ไหลผ่านไดโอดได้จากสมการที่ (1)

$$I_D = I_0 \left( e^{\frac{V_D}{a N_s V_t}} - 1 \right) \quad (1)$$

เมื่อ  $V_t$  และ  $V_D$  เป็นแรงดันอันเนื่องมาจากความร้อนและแรงดันที่ตกคร่อมไดโอด ส่วน  $I_0$  และ  $a$  เป็นกระแสไหลย้อนกลับอ้อมตัวของเซลล์แสงอาทิตย์กับค่าคงที่ไดโอดในอุดมคติ (ideality diode) ตามลำดับ



รูปที่ 2 โครงสร้างและวงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์

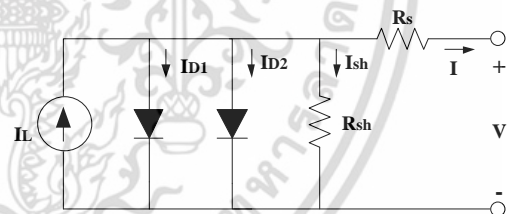
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับแรงดันเนื่องจากความร้อน สามารถหาได้จากสมการที่ (2)

$$V_t = \frac{kT}{q} \quad (2)$$

เมื่อกำหนดให้  $T$  เป็นอุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์สภาวะใช้งาน มีหน่วยเป็นองศาเคลวิน  $k$  เป็นค่าคงที่ของ Boltzmann และ  $q$  เป็นค่าประจุของอิเล็กตรอน

เมื่อพิจารณาโครงสร้างภายในของเซลล์แสงอาทิตย์ จะมีความต้านทานแฝงภายในเกิดขึ้นในเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งประกอบด้วยความต้านทานอนุกรม ( $R_s$ ) เกิดจากผลของความต้านทานจากหน้าสัมผัสต่างๆ และความต้านทานขนาน ( $R_{sh}$ ) ซึ่งเกิดจากความสูญเสียภายในเซลล์แสงอาทิตย์ และนอกจากนั้นเซลล์แสงอาทิตย์อะมอร์ฟัสซิลิคอนยังมีปรากฏการณ์การรวมตัว ทำให้แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดหนึ่งไดโอด ดังรูปที่ 2 (ข) ไม่สามารถอธิบายปรากฏการณ์นี้ได้ จึงมีการปรับปรุงเป็นแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสองไดโอด ดังรูปที่ 3 เมื่อ  $I_{D1}$  เป็นกระแสไฟฟ้าเนื่องจากการรวมตัวของพาหะในบริเวณพื้นผิวของเซลล์แสงอาทิตย์ และ  $I_{D2}$  เป็นกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากการรวมตัวของพาหะบริเวณรอยต่อ



รูปที่ 3 วงจรสมมูลแบบสองไดโอด

กระแสไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์สามารถหาได้จากสมการที่ (3)

$$I = I_L - I_{D1} - I_{D2} - \frac{V + I R_s}{R_{sh}} \quad (3)$$

โดย  $I_{D1} = I_{01} \left( e^{\frac{V}{a_1 N_s V_t}} - 1 \right)$  และ  $I_{D2} = I_{02} \left( e^{\frac{V + I R_s}{a_2 N_s V_t}} - 1 \right)$

เมื่อ  $I_{01}$  และ  $I_{02}$  คือกระแสไฟฟ้าอ้อมตัวเนื่องจากการรวมตัวของพาหะในบริเวณพื้นผิว และบริเวณรอยต่อของเซลล์แสงอาทิตย์ ตามลำดับ

ส่วนกระแสลัดวงจร แรงดันเปิดวงจร กระแสที่กำลังไฟฟ้าสูงสุด และกำลังไฟฟ้าสูงสุด หาได้จากสมการที่ (4) – (7) ตามลำดับ

กระแสลัดวงจร ( $I_{sc}$ )

$$I_{sc} = I_L - I_{01} \left( e^{\frac{I_{sc} R_s}{a_1 N_s V_t}} - 1 \right) - I_{02} \left( e^{\frac{I_{sc} R_s}{a_2 N_s V_t}} - 1 \right) - \frac{I_{sc} R_s}{R_{sh}} \quad (4)$$

แรงดันเปิดวงจร ( $V_{oc}$ )

$$0 = I_L - I_{01} \left( e^{\frac{V_{oc}}{a_1 N_s V_t}} - 1 \right) - I_{02} \left( e^{\frac{V_{oc}}{a_2 N_s V_t}} - 1 \right) - \frac{V_{oc}}{R_{sh}} \quad (5)$$

กระแสที่ก้ำกั้วไฟฟ้าสูงสุด ( $I_{mp}$ )

$$I_{mp} = I_L - I_{01} \left( e^{\frac{V_{mp} + I_{mp} R_s}{a_1 N_s V_t}} - 1 \right) - I_{02} \left( e^{\frac{V_{mp} + I_{mp} R_s}{a_2 N_s V_t}} - 1 \right) - \frac{V_{mp} + I_{mp} R_s}{R_{sh}} \quad (6)$$

ก้ำกั้วไฟฟ้าสูงสุด ( $P_{mp}$ )

$$P_{mp} = V_{mp} I_{mp} \quad (7)$$

ข้อมูลจากผู้ผลิตแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ได้แก่ ก้ำกั้วไฟฟ้าสูงสุด ( $P_{mp,STC}$ ), แรงดันเปิดวงจร ( $V_{oc,STC}$ ), กระแสลัดวงจร ( $I_{sc,STC}$ ), แรงดันที่ทำให้เกิดก้ำกั้วไฟฟ้าสูงสุด ( $V_{mp,STC}$ ) และกระแสที่ทำให้เกิดก้ำกั้วไฟฟ้าสูงสุด ( $I_{mp,STC}$ ) ที่สภาวะเงื่อนไขทดสอบมาตรฐาน (Standard Test Condition : STC) ที่อุณหภูมิของแผงเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส ( $T_{STC} = 273 + 25$ ) ความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ ( $G_{STC}$ ) เท่ากับ 1000 วัตต์/ตารางเมตร และ air mass (AM) เท่ากับ 1.5

สำหรับพารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความเข้มแสง แสดงความสัมพันธ์ดังนี้

แรงดันไฟฟ้าเนื่องจากความร้อน

$$V_{t,STC} = \frac{kT_{STC}}{q} \quad (8)$$

ความต้านทานอนุกรม

$$R_s \approx R_{s,STC} \quad (9)$$

ความต้านทานขนาน

$$R_{sh} = R_{sh,STC} \left( \frac{G_{STC}}{G} \right) \quad (10)$$

ค่าคงที่ไดโอดในอุดมคติ

$$a \approx a_{STC} \quad (11)$$

กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเนื่องจากแสงตกกระทบ

$$I_L = I_{L,STC} + K_i (T - T_{STC}) \frac{G}{G_{STC}} \quad (12)$$

เมื่อ  $I_{L,STC}$  เป็นกระแสที่เกิดขึ้นเนื่องจากแสงตกกระทบที่สภาวะ STC,  $G$  เป็นความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ที่สภาวะใช้งาน และ  $K_i$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์กระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

กระแสไหลย้อนกลับอิมิตัววงจรสมมูลสองไดโอด

$$I_{01} = I_{01,STC} \left( \frac{T}{T_{STC}} \right)^3 e^{\frac{qE_g}{a_1 k} \left( \frac{1}{T_{STC}} - \frac{1}{T} \right)} \quad (13)$$

$$I_{02} = I_{02,STC} \left( \frac{T}{T_{STC}} \right)^3 e^{\frac{qE_g}{a_2 k} \left( \frac{1}{T_{STC}} - \frac{1}{T} \right)} \quad (14)$$

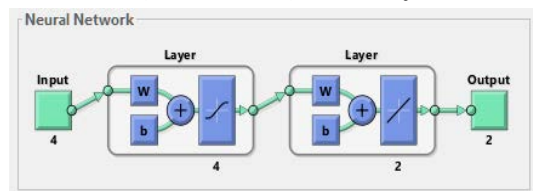
เมื่อ  $E_g$  เป็นพลังงานระหว่างชั้นช่องว่างของสารกึ่งตัวนำ

### 3 วิธีการหาค่าพารามิเตอร์ที่นำเสนอ

งานวิจัยนี้นำเสนอการหาค่าพารามิเตอร์แบบใหม่ของวงจรสมมูลแบบสองไดโอด ซึ่งวิธีการที่นำเสนอจะมีขั้นตอนหลักๆ 2 ขั้นตอน ได้แก่ วิธีการหาขอบเขตที่เป็นไปได้ของตัวแปรออกแบบ โดยใช้วิธีการโครงข่ายประสาทเทียม (artificial neural network) และวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบการเคลื่อนตัวของอนุภาค เพื่อหาค่าพารามิเตอร์วงจรสมมูลของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยมีรายละเอียดดังนี้

#### 3.1 การหาขอบเขตของตัวแปรออกแบบ

การหาขอบเขตของตัวแปร ด้วยวิธีโครงข่ายประสาทเทียมที่เรียนรู้จากฐานข้อมูลแผงเซลล์แสงอาทิตย์ของ California Energy Commission (CEC) โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่ย้อนกลับ ซึ่งโครงสร้างประกอบด้วยชั้นต่างๆ ได้แก่ ชั้นอินพุต (input layer) เป็นส่วนที่รับค่าอินพุต ได้แก่ แรงดันเปิดวงจร กระแสลัดวงจร แรงดันและกระแสที่ทำให้เกิดก้ำกั้วไฟฟ้าสูงสุดที่สภาวะ STC ชั้นเอาต์พุต (output layer) เป็นส่วนข้อมูลเอาต์พุต ได้แก่ ความต้านทานอนุกรมและความต้านทานขนานของวงจรสมมูลที่สภาวะ STC และชั้นซ่อน (hidden layer) อยู่ระหว่างชั้นอินพุตกับชั้นเอาต์พุต แสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 การหาค่าพารามิเตอร์วงจรสมมูล

การหาค่าพารามิเตอร์วงจรสมมูลแบบสองไดโอดที่สภาวะ STC ด้วยวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบการเคลื่อนตัวของอนุภาคโดยใช้ข้อมูลแผงเซลล์แสงอาทิตย์จากผู้ผลิต ร่วมกับการกำหนดขอบเขตของตัวแปรออกแบบ มีขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดค่าเริ่มต้นตัวแปรที่ออกแบบอยู่ในช่วงขอบเขตของตัวแปรออกแบบ โดยการสุ่มข้อมูลแบบสม่ำเสมอ ได้แก่ ความต้านทานอนุกรม ( $R_{s,STC}$ ) และความต้านทานขนาน ( $R_{sh,STC}$ ) ของวงจรสมมูลแบบหนึ่งไดโอดหรือแบบสองไดโอด

ขั้นตอนที่ 2 ค่าที่ได้จากขั้นตอนที่ 1 จำนวนค่าต่างๆดังนี้ กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากแสงตกกระทบบนที่สภาวะ STC ได้จากสมการที่ (15)

$$I_{L,STC} = \left( \frac{R_{s,STC} + R_{sh,STC}}{R_{sh,STC}} \right) I_{sc,STC} \quad (15)$$

วงจรสมมูลแบบสองไดโอด ค่าคงที่ไดโอดในอุดมคติ และกระแสไหลย้อนกลับอิ่มตัว ที่สภาวะ STC หาได้จากสมการที่ (16) – (18) ตามลำดับ [9]

$$a_{1,STC} = \frac{\left( K_V - \frac{V_{oc,STC}}{I_{STC}} \right)}{\left( N_s V_{t,STC} \left( \frac{K_f}{I_{L,STC}} - \frac{3}{T_{STC}} - \frac{E_g}{kT_{STC}^2} \right) \right)} \quad (16)$$

$$I_{01,STC} = \frac{\left( I_{L,STC} - \frac{V_{oc,STC}}{R_{sh,STC}} \right)}{\frac{V_{oc,STC}}{(e^{a_{1,STC} N_s V_{t,STC}} - 1)} + \frac{V_{oc,STC}}{(e^{a_{2,STC} N_s V_{t,STC}} - 1)}} \quad (17)$$

$$a_{2,STC} = 2a_{1,STC} \text{ และ } I_{02,STC} = I_{01,STC} \quad (18)$$

ขั้นตอนที่ 3 ค่าตัวแปรที่ได้จากขั้นตอนที่ 1 และขั้นตอนที่ 2 จะได้พารามิเตอร์ของวงจรสมมูลที่ได้จากวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบการเคลื่อนตัวของอนุภาค แล้วนำมาหาค่ากระแสลัดวงจรที่ได้จากการคำนวณ ( $I_{sc,cal}$ ), แรงดันเปิดวงจรที่ได้จากการคำนวณ ( $V_{oc,cal}$ ), กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ได้จากการคำนวณ ( $P_{mp,cal}$ ) จำนวนได้จากสมการที่ (4) – (7) ตามลำดับ

ขั้นตอนที่ 4 ฟังก์ชันเป้าหมายเป็นกำลังสองน้อยที่สุดระหว่างข้อมูลของกระแสลัดวงจร แรงดันเปิดวงจร กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ได้ จากการคำนวณกับข้อมูลผู้ผลิต แสดงดังสมการที่ (19)

$$F_{obj} = \frac{1}{2} \left| \frac{I_{sc,cal}}{I_{sc,STC}} - 1 \right|^2 + \frac{1}{2} \left| \frac{V_{oc,cal}}{V_{oc,STC}} - 1 \right|^2 + \frac{1}{2} \left| \frac{P_{mp,cal}}{P_{mp,STC}} - 1 \right|^2 \quad (19)$$

ขั้นตอนที่ 5 ประเมินผลเพื่อหาค่าพารามิเตอร์วงจรสมมูลที่ทำให้ฟังก์ชันเป้าหมายมีค่าน้อยที่สุด ด้วยกระบวนการที่เหมาะสมแบบการเคลื่อนตัวของอนุภาค จากนั้นวนซ้ำขั้นตอนที่ 2 - 5 จนกว่าครบจำนวนรอบตามที่กำหนด จากนั้นทำตามขั้นตอนที่ 6

ขั้นตอนที่ 6 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม โดยค่าพารามิเตอร์ที่ประเมินมีผลทำให้ฟังก์ชันเป้าหมายมีค่าน้อยที่สุดเป็นค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลแผงเซลล์แสงอาทิตย์

### 4. ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

กำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นของวิธีการที่นำเสนอ ดังนี้ จำนวนประชากร เท่ากับ 2000 จำนวนรอบ 100 รอบ อัตราเร่งเท่ากับ 1.4962 โดยจะทำการหาค่าพารามิเตอร์วงจรสมมูลของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ รุ่น BS-41L ซึ่งเป็นแผงที่ไม่มีอยู่ในฐานข้อมูลของ CEC แสดงข้อมูลดังตารางที่ 1 และค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลแบบสองไดโอดที่สภาวะ STC ด้วยวิธีการที่นำเสนอ แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 1 ข้อมูลแผงเซลล์แสงอาทิตย์จากผู้ผลิต

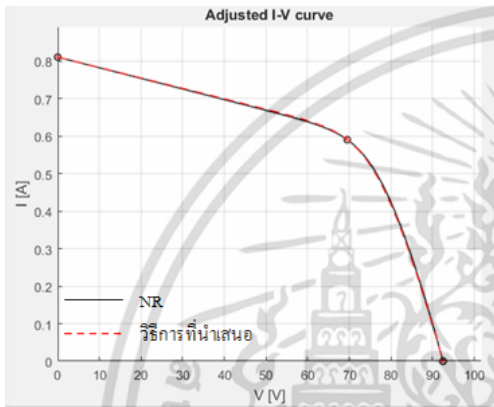
แผงเซลล์แสงอาทิตย์ รุ่น BS-41L	
Maximum power ( $P_{mp}$ )	41 W
Open circuit voltage ( $V_{oc}$ )	92.5 V
Short circuit current ( $I_{sc}$ )	0.81 A
Voltage at maximum power point ( $V_{mp}$ )	69.5 V
Current at maximum power point ( $I_{mp}$ )	0.59 A

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ของวงจรสมมูลแบบสองไดโอด

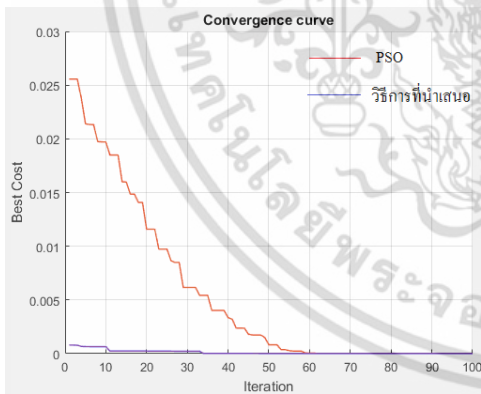
พารามิเตอร์	ต้นแบบสองไดโอด
$I_{L,STC}$	0.8549 A
$I_{01,STC} \cdot I_{02,STC}$	2.5694e-11 A
$a_{1,STC}$	2.650
$a_{2,STC}$	5.301
$R_{s,STC}$	18.7731 ohm
$R_{sh,STC}$	338.7552 ohm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำพารามิเตอร์จากตารางที่ 2 มาคำนวณหาคุณลักษณะทางไฟฟ้า พบว่ากราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าสอดคล้องกับกราฟที่ได้จากวิธีนิวตัน-ราฟสัน ซึ่งเป็นวิธีการที่ใกล้เคียงกับการทดสอบของ CEC แสดงความสัมพันธ์กระแสและแรงดันดังรูปที่ 5 และเมื่อพิจารณาการลู่เข้าระหว่างวิธีการที่นำเสนอกับเทคนิคการหาค่าเหมาะสมแบบกลุ่มอนุภาค (PSO) โดยใช้เงื่อนไขเริ่มต้นเดียวกัน แสดงดังรูปที่ 6 ซึ่งพบว่าวิธีการที่นำเสนอลู่เข้าหาค่าตอบได้เร็วกว่าวิธีการ PSO แบบดั้งเดิม



รูปที่ 5 กราฟคุณลักษณะทางไฟฟ้าวิธีการที่นำเสนอเปรียบเทียบกับวิธีการทำซ้ำแบบนิวตัน-ราฟสัน



รูปที่ 6 การลู่เข้าหาค่าตอบระหว่างวิธี PSO แบบดั้งเดิมกับวิธีการที่นำเสนอ

นำค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากวิธีการที่นำเสนอมาคำนวณหากระแสลัดวงจร แรงดันไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้าที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด และกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่สภาวะ STC เปรียบเทียบกับข้อมูลจากผู้ผลิต พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน เช่น กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ได้จากต้นแบบ มีค่าเท่ากับ 41.012 W ซึ่งมีค่าต่างจากผู้ผลิต 0.029 % เป็นต้น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

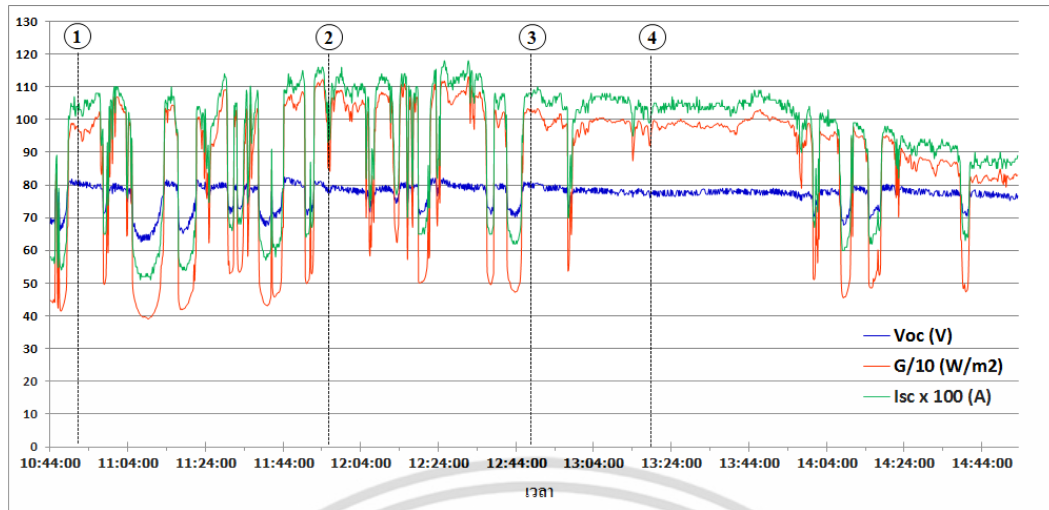
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นพารามิเตอร์ที่ได้จากวิธีการที่นำเสนอ สามารถแสดงผลได้ใกล้เคียงกับข้อมูลผู้ผลิต แสดงในตารางที่ 3

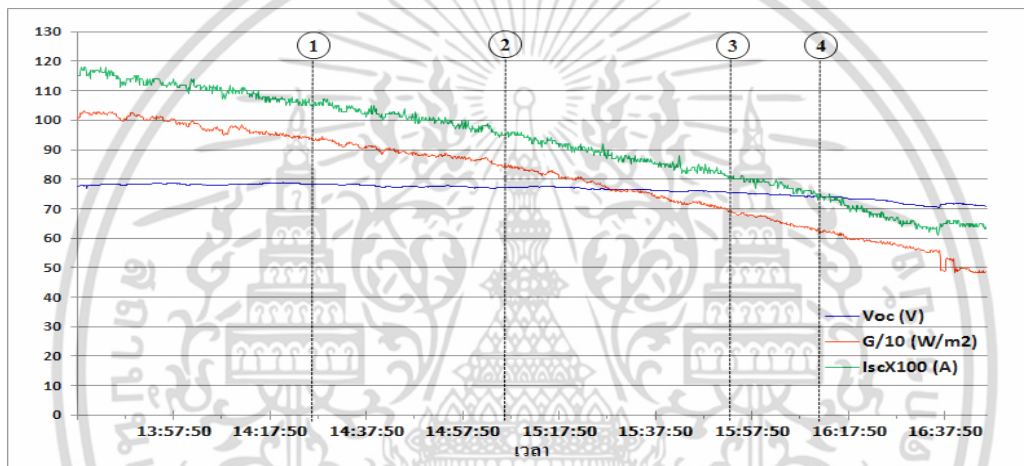
ตารางที่ 3 ข้อมูลแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่สภาวะ STC

	ผู้ผลิต	ต้นแบบสองไดโอด	ผิดพลาด
$I_{sc,STC}$	0.81 A	0.81 A	0 %
$V_{mp,STC}$	69.5 V	69.61 V	0.158 %
$I_{mp,STC}$	0.59 A	0.582 A	0.136 %
$P_{mp,STC}$	41 W	41.012 W	0.029 %

จากนั้นนำแผงเซลล์แสงอาทิตย์ รุ่น BS-41L มาทำการทดสอบภายนอกอาคาร (outdoor) ในเงื่อนไขเปิดวงจร (open-circuit) และลัดวงจร (short-circuit) โดยวัดอุณหภูมิเซลล์แสงอาทิตย์และสิ่งแวดล้อมด้วยเทอร์โมคัปเปิล type K วัดความเข้มแสงด้วยไพรานอมิเตอร์ เซนเซอร์ รุ่น SKS 1110 แบ่งการทดสอบเป็น 2 กรณี โดยวันแรกทำการทดสอบกรณีความเข้มแสงมาก (เวลา 10:44:00-14:53:10 น.) การทดสอบแสดงข้อมูลดังรูปที่ 7 (ก) และวันที่สองทำการทดสอบกรณีความเข้มแสงน้อย (เวลา 13:38:00-14:46:20 น.) ผลการทดสอบแสดงข้อมูลดังรูปที่ 7 (ข) ค่าความเข้มแสงและกระแสลัดวงจรจะถูกปรับให้มีค่าอยู่ในช่วงเดียวกับค่าแรงดันเปิดวงจรเพื่อให้สามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ โดยค่าความเข้มแสงจะถูกปรับให้มีอัตราส่วนลดลง 10 เท่าจากค่าที่วัดได้ และค่ากระแสลัดวงจรจะเพิ่มขึ้นเป็นอัตราส่วน 100 เท่าของค่าที่วัดได้ จากรูปที่ 7 ทำการสุ่มตัวอย่างข้อมูลการทดสอบเพื่อนำมาเปรียบเทียบแรงดันเปิดวงจร ( $V_{oc}$ ) กับ กระแสลัดวงจร ( $I_{sc}$ ) ระหว่างข้อมูลที่ได้จากการทดสอบกับข้อมูลที่ได้จากการคำนวณของวงจรมูลของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ สำหรับข้อมูลการทดสอบจากกราฟสามารถหาค่าความเข้มแสงและกระแสลัดวงจรที่ได้จากการทดสอบจริง ดังนี้ พิจารณาการทดสอบกรณีความเข้มแสงมาก รูปที่ 7 (ก) ตัวอย่างข้อมูล จุดที่ 1 ณ เวลา 10:49:20 น. ค่าความเข้มแสงจากกราฟมีค่า 98.728 สามารถหาค่าที่ได้จากการทดสอบ คือ  $98.728 \times 10 = 987.28 \text{ W/m}^2$  สำหรับกระแสลัดวงจรจากกราฟมีค่า 105 ดังนั้นค่ากระแสลัดวงจรที่ได้จากการทดสอบจะมีค่า  $105/100 = 1.05 \text{ A}$  ตัวอย่างข้อมูลการทดสอบ ดังตารางที่ 4



(ก) การทดสอบในสภาวะความเข้มแสงมาก



(ข) การทดสอบในสภาวะความเข้มแสงน้อย

รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $V_{oc}$ ,  $I_{sc}$  กับ G (ก) สภาวะความเข้มแสงมาก (ข) สภาวะความเข้มแสงน้อย

ตารางที่ 4 ข้อมูลการทดลองเปิดวงจรและวงจรลัด

ลำดับ	Times	$V_{oc}$ (V)	$I_{sc}$ (A)	G ( $W/m^2$ )	T ( $^{\circ}C$ )
การทดสอบในสภาวะความเข้มแสงมาก					
1	10:49:20	80.48	1.05	987.28	45.2
2	11:54:30	79.24	1.14	1103.83	49.6
3	12:46:50	80.36	1.07	1031.14	48.6
4	13:17:40	77.95	1.06	981.59	54.1
การทดสอบในสภาวะความเข้มแสงน้อย					
1	14:24:20	78.40	1.05	938.95	52.2
2	15:00:40	77.08	0.96	865.44	54.3
3	15:52:20	75.60	0.81	700.96	50.5
4	16:10:00	74.12	0.76	633.95	49.6

ตารางที่ 5 แรงดันและกระแสที่ได้จากวงจรสมมูล

ลำดับ	Times	$V_{oc}$ (V)	ผิดพลาด (%)	$I_{sc}$ (A)	ผิดพลาด (%)
การทดสอบในสภาวะความเข้มแสงมาก					
1	10:49:20	79.65	1.031	1.14	6.667
2	11:54:30	77.83	1.779	1.24	6.140
3	12:46:50	78.43	2.402	1.15	6.542
4	13:17:40	75.15	3.592	1.16	7.547
การทดสอบในสภาวะความเข้มแสงน้อย					
1	14:24:20	75.53	3.661	1.10	4.762
2	15:00:40	74.28	3.633	1.02	6.250
3	15:52:20	74.98	0.820	0.83	2.469
4	16:10:00	75.53	1.902	0.73	3.947

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4 เมื่อเปรียบเทียบแรงดันเปิดวงจร ( $V_{oc}$ ) และ กระแสลัดวงจร ( $I_{sc}$ ) กับข้อมูลที่ได้จากวงจรสมมูลโดยพิจารณาผลของอุณหภูมิกับความเข้มแสงจากผลการทดสอบ ดังสมการที่ (8) – (14) พบว่าแรงดันเปิดวงจรมีค่าความผิดพลาดไม่เกิน 4% ส่วนกระแสลัดวงจรมีค่าความผิดพลาดไม่เกิน 8% แสดงข้อมูลดังตารางที่ 5 ดังนั้นพารามิเตอร์ที่ได้จากวิธีการที่นำเสนอสามารถแสดงผลได้ใกล้เคียงกับข้อมูลการทดสอบ และวงจรสมมูลแบบสองไดโอดสามารถใช้งานได้ทั้งกรณีที่มีความเข้มแสงมากและความเข้มแสงน้อย

## 5. สรุป

วิธีหาค่าพารามิเตอร์วงจรสมมูลที่นำเสนอ เป็นการใช้นิยามการเคลื่อนตัวของอนุภาคที่เหมาะสม ร่วมกับการกำหนดขอบเขตของตัวแปรด้วยเทคนิคโครงข่ายประสาทเทียม สามารถนำมาใช้งานได้จริง มีการลู่เข้าหาคำตอบได้เร็วกว่าวิธีการ PSO แบบดั้งเดิม โดยที่วงจรสมมูลที่ได้จากวิธีการที่เสนอ แสดงผลทางไฟฟ้าได้ใกล้เคียงกับข้อมูลจากผู้ผลิตที่สภาวะ STC และการทดสอบที่สภาวะใช้งานจริง ทั้งกรณีความเข้มแสงมากกับความเข้มแสงน้อย สำหรับวงจรสมมูลแบบสองไดโอดเหมาะสมสำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์อะมอร์ฟัสซิลิคอนแบบฟิล์มบาง เนื่องจากมีการตอบสนองทั้งกรณีความเข้มแสงมากและความเข้มแสงน้อย ทำให้ผลทางไฟฟ้าใกล้เคียงกับการทดสอบทั้งสองกรณี

## 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] V.V. Tyagi, Nurul A.A. Rahim , N.A. Rahim , Jeyraj A.L. Selvaraj, "Progress in solar PV technology : Research and achievement," Renewable and Sustainable Energy Review, Vol.2, pp.443-461, 2013.
- [2] Antonino Laudani, Francesco Riganti Fulginei, Alessandro Salvini, "Identification of the one-diode model for photovoltaic modules from datasheet values," Solar Energy , Vol.108, pp.432-446, 2014.
- [3] Gabriel Cibira, Marcela Kosocova, "Photovoltaic module parameters acquisition model," Applied Surface Science, Vol.312, pp.74-80, 2014.
- [4] Elbaset AA, Ali H, Abd-El Sattar, "Novel seven parameter model for photovoltaic modules," Solar Energy Materials & Solar Cells, Vol.130, pp.442-455, 2014.
- [5] Ali M.Humada, Mojgan Hojabri, Saad Mekhilef , Hussein M.Hamada, "Solar cell parameters extraction based on single and double-diode Models :A review," Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol.56, pp.494-509, 2016.
- [6] Marcelo Gradella Villalva, Jonas Rafael Gazoli and Ernesto Ruppert Filho. Modelling and Circuit-Based Simulation of Photovoltaic Arrays. Proceeding of Brazilian Power Electronics Conference, Sept 27 - Oct 1 2009 : 1244 – 1254.
- [7] Sandrolini L, Artioli M and Reggiani U, "Numerical method for the extraction of photovoltaic module double-diode model parameters through cluster analysis," Applied Energy, Vol.87, No.2, pp.442-451, 2010.
- [8] I. Nassar-eddine, A. Obbadi, Y. Errami, A. El fajri, M. Agunaou, "Parameter estimation of photovoltaic modules using iterative method and the Lambert W function: A comparative study," Energy Conversion and Management "Vol..119, pp.37-48, 2016.
- [9] M.S. Ismail, M. Moghavvemi, T.M.I. Mahlia, "Characterization of PV panel and global optimization of its model parameters using genetic algorithm," Energy Conversion and Management, Vol.73, pp.10-25, 2013.
- [10] Ali Dali, Abderrezzak Bouharchouche, Said Diaf , "Parameter identification of photovoltaic cell/module using genetic algorithm (GA) and particle swarm optimization(PSO)," IEEE International Conference on Control, Engineering & Information Technology (CEIT), pp.1-6, 2015.
- [11] Mohamed A. Awadallah, "Variations of the bacterial foraging algorithm for the extraction of PV module parameters from nameplate data," Energy Conversion and Management," Vol.113, pp.312-320, 2016.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้