



## รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้โซลาร์เซลล์ร่วมกับเทอร์โมอิเล็กทริกส์โมดูล  
เพื่อผลิตไฟฟ้า

Feasibility Study of photovoltaic – Thermoelectric hybrid  
modules for Power Generator

ดร.อาภาภรณ์ สกุลการะเวก

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2558

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



## รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้โซลาร์เซลล์ร่วมกับเทอร์โมอิเล็กทริกส์โมดูล  
เพื่อผลิตไฟฟ้า

Feasibility Study of photovoltaic – Thermoelectric hybrid  
modules for Power Generator

Dr.Aparporn Sakulalavek

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2558  
คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ชื่อโครงการ การศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้โซลาร์เซลล์ร่วมกับเทอร์โมอิเล็กทริกส์โมดูลเพื่อผลิตไฟฟ้า.....

แหล่งเงิน งบประมาณเงินรายได้.....

ประจำปีงบประมาณ..... 2558..... จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน ..... 50,000 ..... บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย..... 1..... ปี ตั้งแต่ 1 ตุลาคม 2557 ถึง 30 กันยายน 2558.....

ชื่อ-สกุล หัวหน้าโครงการ และผู้ร่วมโครงการวิจัย พร้อมระบุ หน่วยงานต้นสังกัด

.....อาภาภรณ์ สกุลการะเวก สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร

ลาดกระบัง

### บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ได้ตรวจสอบประสิทธิภาพของระบบรวมเซลล์แสงอาทิตย์และเทอร์โมอิเล็กทริก โมดูล เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลประสิทธิภาพสูงจำนวน 4 ตัวถูกนำมาต่ออนุกรมและนำไปติดตั้งด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัส ระบบระบายความร้อนประกอบด้วยฮีทซิงค์ที่ทำจากอะลูมิเนียมที่มีการติดตั้งพัดลมและไม่ติดตั้งพัดลม ผลการทดลองพบว่าการลดลงของประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์เนื่องจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นมีค่าน้อยกว่าประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นของเทอร์โมอิเล็กทริก เมื่อระบบระบายความร้อนเป็นฮีทซิงค์ประสิทธิภาพสูงสุดของระบบผลิตไฟฟ้ารวมมีค่าประมาณ 6.7% และเมื่อระบบระบายความร้อนเป็นฮีทซิงค์ร่วมกับพัดลมประสิทธิภาพสูงสุดของระบบผลิตไฟฟ้ารวมมีค่าประมาณ 7.3% ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่ามีความเป็นไปได้ที่จะใช้เทอร์โมอิเล็กทริกเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

คำสำคัญ : เซลล์แสงอาทิตย์ เทอร์โมอิเล็กทริก ระบบรวม

**Research Title:** Feasibility Study of photovoltaic – Thermoelectric hybrid

modules for Power Generator

**Researcher:** .....Aparporn Sakulkalavek.....

**Faculty:** .....Science.....**Department:** .....Physics.....

### **Abstract**

In this work, the combined performance of solar cell and thermoelectric module was investigated. Four high efficiency of thermoelectric modules were connected in series and applied directly on the back of amorphous solar cell. Aluminum heat sink with and without fan were used to cooling system. The result showed that the degradation of solar cell efficiency with temperature was smaller than the increase in efficiency produced by the thermoelectric. The maximum efficiency of system with and without fan were 6.7% and 7.3%, respectively. Our results indicate that it is significantly feasible to use a thermoelectric module to improve the performance of the solar cell.

Keywords : Photovoltaic, Thermoelectric, hybrid system

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ขอขอบคุณ นาย ภูวดล วิบูลย์ชูวรรนนท์ นางสาว สุนิสา  
สุรพันธ์ และ นางสาว อมينا ชินเสนา ที่ให้ความช่วยเหลือในการจัดเก็บข้อมูล ขอขอบคุณ ดร. ราช-  
ศักดิ์ ศักดานุภาพ ที่ให้คำปรึกษาด้านการออกแบบระบบจัดเก็บข้อมูลอัตโนมัติ โดยการวิจัยครั้งนี้  
ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร  
ลาดกระบัง ประเพณีส่งเสริมนักวิจัย ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2558

อาภาภรณ์ สกุลการะเวก

# สารบัญ

|                                                            | หน้า |
|------------------------------------------------------------|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย                                            | I    |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ                                         | II   |
| กิตติกรรมประกาศ                                            | III  |
| สารบัญ                                                     | IV   |
| สารบัญตาราง                                                | VII  |
| สารบัญรูป                                                  | VIII |
| <br>                                                       |      |
| <b>บทที่1 บทนำ</b>                                         |      |
| 1.1 ที่มาและความสำคัญ                                      | 1    |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย                                | 1    |
| 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย                                      | 2    |
| 1.4 ขั้นตอนของงานวิจัย                                     | 2    |
| 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย                   | 3    |
| <b>บทที่2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>                |      |
| 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง                                  | 4    |
| 2.2 ทฤษฎี                                                  | 5    |
| 2.2.1 เซลล์แสงอาทิตย์                                      | 5    |
| 2.2.1.1 ต้นกำเนิดเซลล์แสงอาทิตย์                           | 5    |
| 2.2.1.2 ชนิดของเซลล์แสงอาทิตย์                             | 5    |
| 2.2.1.3 หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์                     | 7    |
| 2.2.1.4 ลักษณะกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์             | 8    |
| 2.2.2 เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล                               | 9    |
| 2.2.2.1 ปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริก(Thermoelectric Effect) | 10   |
| 2.2.2.2 โครงสร้างของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล                 | 11   |
| 2.2.2.3 หลักการทำงานของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล              | 11   |
| 2.2.3 การระบายความร้อน (Heat Rejection)                    | 12   |
| 2.2.3.1 ประเภทของการระบายความร้อน                          | 13   |
| 2.2.3.2 หลักการทำงานของฮีทซิงค์ (Heat Sink)                | 14   |
| <b>บทที่3 อุปกรณ์และวิธีการดำเนินงานวิจัย</b>              |      |
| 3.1 การออกแบบอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย                       | 16   |
| 3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย                              | 16   |
| 3.1.1.1 เซลล์แสงอาทิตย์                                    | 16   |
| 3.1.1.2 เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล                             | 17   |

## สารบัญ(ต่อ)

|                                                                                                                                                        | หน้า |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 3.1.1.3 ฮีทซิงค์                                                                                                                                       | 17   |
| 3.1.1.4 แผ่นทองแดง                                                                                                                                     | 18   |
| 3.1.1.5 เทอร์โมคัปเปิลแบบหางปลากลม                                                                                                                     | 19   |
| 3.1.1.6 ตัวต้านทานปรับค่าได้ Rheostat ขนาด 33 Ω                                                                                                        | 19   |
| 3.1.1.7 หลอดไฟ BEC Halogen Floodlight CQ 500D ขนาด 500 W และหลอดไฟ IP 65 E 40 ขนาด 400 W                                                               | 20   |
| 3.1.1.8 สเปกโตรมิเตอร์                                                                                                                                 | 20   |
| 3.1.1.9 ไพรานอมิเตอร์ รุ่น LP02                                                                                                                        | 21   |
| 3.1.1.10 พัดลมไฟฟ้าขนาด 12 วัตต์                                                                                                                       | 21   |
| 3.1.1.11 ระบบจัดเก็บข้อมูลอัตโนมัติ                                                                                                                    | 22   |
| 3.1.1.12 โปรแกรม Lab View                                                                                                                              | 23   |
| 3.1.2 ขั้นตอนการออกแบบชิ้นงาน                                                                                                                          | 24   |
| 3.1.2.1 การออกแบบชิ้นงาน                                                                                                                               | 24   |
| 3.1.2.2 การเลือกใช้หลอดไฟเป็นแหล่งกำเนิดแสง                                                                                                            | 27   |
| 3.1.2.3 การกำหนดระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดแสงกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์                                                                                     | 27   |
| 3.1.2.4 การทดสอบค่าความแตกต่างของอุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์                                                                                         | 28   |
| 3.1.2.5 การทดสอบประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล                                                                                                   | 28   |
| 3.1.2.6 การทดสอบกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตกำลังไฟฟ้าของระบบรวมเซลล์แสงอาทิตย์และเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลแบบไม่มีระบบระบายความร้อน | 29   |
| 3.1.2.7 การทดสอบกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตกำลังไฟฟ้าของระบบรวมเซลล์แสงอาทิตย์และเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลแบบมีพัดลมระบายความร้อน   | 30   |
| <b>บทที่4 สรุปผลและอภิปรายผล</b>                                                                                                                       |      |
| 4.1 การเลือกใช้หลอดไฟเพื่อเป็นแหล่งกำเนิดแสง                                                                                                           | 31   |
| 4.2 การกำหนดระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดแสงกับเซลล์แสงอาทิตย์                                                                                            | 33   |
| 4.3 การทดสอบค่าความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดของเซลล์แสงอาทิตย์                                                                     | 34   |
| 4.4 การทดสอบประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล                                                                                                       | 35   |
| 4.5 การศึกษาความเป็นไปได้ของระบบผลิตกำลังไฟฟ้ารวมเซลล์แสงอาทิตย์และเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลแบบมีพัดลมระบายความร้อนและแบบไม่มีพัดลมระบายความร้อน          | 36   |

## สารบัญ(ต่อ)

|                                    | หน้า |
|------------------------------------|------|
| บทที่5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ |      |
| 5.1 สรุปผลการวิจัย                 | 42   |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ                     | 42   |
| เอกสารอ้างอิง                      |      |
| ภาคผนวก                            |      |

# สารบัญตาราง

| ตาราง                                                                                                                                                                                                                                               | หน้า |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 1.1 ตารางชั้นงานวิจัย                                                                                                                                                                                                                               | 2    |
| 3.1 คุณสมบัติของเทอร์โมอิเล็กทริก รุ่น DT12-6                                                                                                                                                                                                       | 17   |
| 4.1 แสดงผลต่างของอุณหภูมิ( $^{\circ}\text{C}$ ), กำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์และ<br>เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล (W) ที่ได้มีการบันทึกเก็บข้อมูลทุกๆ 1 นาที ของระบบ<br>แบบไม่มีพัดลมระบายความร้อน                                                         | 37   |
| 4.2 แสดงผลต่างของอุณหภูมิ( $^{\circ}\text{C}$ ), กำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์และ<br>เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล (W) ที่ได้มีการบันทึกเก็บข้อมูลทุกๆ 1 นาที ของ<br>ระบบแบบมีพัดลมระบายความร้อน                                                            | 38   |
| 4.3 การเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลและเซลล์แสงอาทิตย์<br>และค่ากำลังไฟฟ้าของระบบรวมแบบมีพัดลมระบายความร้อน, ไม่มีพัดลม<br>ระบายความร้อน (ฮีตซิงค์ A) และไม่มีมีพัดลมระบายความร้อนเมื่อเปลี่ยนขนาด<br>ของฮีตซิงค์ (ฮีตซิงค์ B) | 41   |

## สารบัญรูป

| รูปที่                                                                                                    | หน้า |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 2.1 เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากซิลิคอนชนิดผลึกเดี่ยว                                                          | 6    |
| 2.2 เซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกโพลี                                                                            | 6    |
| 2.3 เซลล์แสงอาทิตย์แบบอะมอร์ฟัสซิลิกอน                                                                    | 7    |
| 2.4 แสดงการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์                                                                        | 8    |
| 2.5 การต่อวงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์                                                                     | 8    |
| 2.6 กราฟแสดง I-V (ก) ในสภาวะมีด (ข) ในสภาวะถูกฉายแสง                                                      | 9    |
| 2.7 วงจรการเกิดปรากฏการณ์ซีเบค                                                                            | 10   |
| 2.8 แสดงภาพการเคลื่อนที่ของพาหะข้างมากในสารกึ่งตัวนำที่มีอุณหภูมิสองด้านไม่เท่ากัน                        | 10   |
| 2.9 โครงสร้างภายในของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล                                                               | 11   |
| 2.10 ภาพตัดขวางแสดงโหมดผลิตกระแสไฟฟ้า                                                                     | 12   |
| 2.11 ภาพตัดขวางแสดงโหมดผลิตความเย็นด้วยกระแสไฟฟ้า                                                         | 12   |
| 2.12 ลักษณะของการเคลื่อนที่ความร้อน                                                                       | 13   |
| 3.1 เซลล์แสงอาทิตย์แบบพหุผลึกขนาด 15.5 cm x 15.5 cm                                                       | 16   |
| 3.2 เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล รุ่น DT12-6                                                                    | 17   |
| 3.3 ฮีทซิงค์ (ก) ขนาด 9x10 cm (ข) ขนาด 12 x 19.5 cm                                                       | 18   |
| 3.4 แผ่นทองแดง                                                                                            | 18   |
| 3.5 เทอร์โมคัปเปิล Type K                                                                                 | 19   |
| 3.6 ตัวต้านทานปรับค่าได้ Rheostat ขนาด 33 $\Omega$                                                        | 19   |
| 3.7 การเลือกใช้หลอดไฟ (ก) หลอดไฟ BEC Halogen Floodlight CQ 500D ขนาด 500W (ข) หลอดไฟ IP 65 E 40 ขนาด 400W | 20   |
| 3.8 สเปกโตรมิเตอร์                                                                                        | 20   |
| 3.9 ไพรานอมิเตอร์ รุ่น LP02                                                                               | 21   |
| 3.10 พัดลมไฟฟ้าขนาด 12 วัตต์                                                                              | 21   |
| 3.11 แสดงภาพสัญญาณที่ได้ในระหว่างการทำงาน                                                                 | 22   |
| 3.12 ระบบจัดเก็บข้อมูลอัตโนมัติประกอบด้วย<br>(ก) NI9211 (ข) NI9201 (ค) NI9227 (ง) Data Acquisition (DAQ)  | 23   |
| 3.13 โปรแกรม Lab View                                                                                     | 24   |
| 3.14 การตัดแผ่นทองแดงด้วยเลื่อยตัดเหล็ก                                                                   | 24   |
| 3.15 การเจาะรูแผ่นทองแดงด้วยเครื่องเจาะ                                                                   | 25   |
| 3.16 การติดตั้งเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลบนฮีทซิงค์                                                           | 25   |
| 3.17 การนำแผ่นทองแดงมาติดตั้งลงบนฮีทซิงค์ที่มีเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลติดอยู่                               | 26   |

## สารบัญรูป(ต่อ)

| รูปที่                                                                                                                                                         | หน้า |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 3.18 การนำแผงเซลล์แสงอาทิตย์มาติดตั้งลงบนแผ่นทองแดงที่มีเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลติดอยู่กับฮีทซิงค์                                                               | 26   |
| 3.19 อุปกรณ์การทดลองการหาค่าความเข้มแสงและค่าสเปกตรัม (ก) หลอดไฟ IP 65 E 40 ขนาด 400W (ข) หลอดไฟ BEC Halogen Floodlight CQ 500D ขนาด500W                       | 27   |
| 3.20 อุปกรณ์การทดลองการกำหนดระยะห่างของหลอดไฟ BEC Halogen Floodlight CQ500D ขนาด 500 Wกับ แผงเซลล์แสงอาทิตย์                                                   | 27   |
| 3.21 อุปกรณ์การทดลองในการบันทึกค่า $V_{oc}(V)$ และ $T (^{\circ}C)$ จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ กับหลอดไฟ BEC Halogen Floodlight CQ 500Dขนาด 500 W                    | 28   |
| 3.22 อุปกรณ์การทดลองในการทดสอบประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล กับหลอดไฟ BEC Halogen Floodlight CQ 500Dขนาด 500 W                                          | 28   |
| 3.23 แสดงการต่อวงจรที่ใช้ในการทดสอบหาค่ากำลังไฟฟ้าของระบบรวมเซลล์แสงอาทิตย์และเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล                                                           | 29   |
| 4.1 อุปกรณ์การทดลองการหาค่าความเข้มแสงและสเปกตรัมของแหล่งกำเนิดแสง (ก)หลอดไฟ IP 65 E 40 ขนาด 400 W (ข) หลอดไฟ BEC Halogen Floodlight CQ 500D ขนาด 500 W        | 31   |
| 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มแสงกับค่าสเปกตรัม (ก) หลอดไฟ IP 65 E 40 ขนาด 400 W(ข) หลอดไฟ BEC Halogen Floodlight cq500D ขนาด 500 W (ค) แสงอาทิตย์ | 32   |
| 4.3 อุปกรณ์การทดลองในการกำหนดระยะห่างของหลอดไฟ BEC Halogen Floodlight CQ 500D ขนาด 500 Wกับเซลล์แสงอาทิตย์                                                     | 33   |
| 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างของแหล่งกำเนิดแสงที่ห่างจากพารานอมิเตอร์กับค่าความเข้มแสงของหลอดไฟ BEC Halogen Floodlight CQ 500D ขนาด500W              | 33   |
| 4.5 อุปกรณ์การทดลองในการบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด(V)และอุณหภูมิ( $^{\circ}C$ )ของเซลล์แสงอาทิตย์                                                            | 34   |
| 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด(V)กับอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์( $^{\circ}C$ )                                                           | 35   |

## สารบัญรูป(ต่อ)

| รูปที่ |                                                                                                                                                                                  | หน้า |
|--------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 4.7    | อุปกรณ์การทดลองในการทดสอบประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล                                                                                                                    | 35   |
| 4.8    | กราฟแสดงความสัมพันธ์ค่าความต้านทาน ( $\Omega$ ) กับ กำลังไฟฟ้า (W)                                                                                                               | 36   |
| 4.9    | กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลา (s) กับอุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ )<br>(ก) แบบไม่มีพัดลมระบายความร้อน (ข) แบบมีพัดลมระบายความร้อน                                             | 37   |
| 4.10   | กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\Delta T$ กับค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้ (W) (ก) กำลังไฟฟ้าที่ได้จากระบบรวมแบบไม่มีพัดลมระบายความร้อน (ข) กำลังไฟฟ้าที่ได้จากระบบรวมแบบมีพัดลมระบายความร้อน | 39   |
| 4.11   | กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\Delta T$ ( $^{\circ}\text{C}$ ) กับค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้ (W) เมื่อเปลี่ยนขนาดของฮีทซิงค์                                                             | 40   |

## บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

เนื่องจากวิกฤตการณ์พลังงานในประเทศไทยได้มีการขาดแคลนทรัพยากรในการผลิตไฟฟ้า โดยประเทศไทยต้องสูญเสียเงินเป็นจำนวนมากเพื่อสั่งซื้อสารเชื้อเพลิงที่นำมาใช้ผลิตพลังงานไฟฟ้า เช่น ถ่านหิน เป็นต้น ซึ่งสถานการณ์โลกในปัจจุบันต้องยอมรับว่าเรากำลังเผชิญกับปัญหาด้านทรัพยากรธรรมชาติที่ลดน้อยลง อันเกิดจากปัจจัยหลายด้าน ทั้งการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจ การบริโภคใช้สอยที่เกินพอดี

งานวิจัยนี้ได้มีการตระหนักถึงปัญหาที่กล่าวมาข้างต้นจึงได้มีการใช้พลังงานทดแทนเช่น พลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งถือว่าเป็นทรัพยากรที่ไม่มีวันหมด เป็นพลังงานที่สะอาดและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม สาเหตุเนื่องจากประเทศไทยมีศักยภาพทางด้านพลังงานแสงอาทิตย์ค่อนข้างสูง จึงได้มีการพัฒนาเพื่อนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ให้เกิดประโยชน์ งานวิจัยนี้ได้เห็นว่าหากมีการนำเซลล์แสงอาทิตย์มาใช้เป็นตัวช่วยในการผลิตกระแสไฟฟ้าจะทำให้สามารถใช้พลังงานไฟฟ้าได้โดยตรงไม่ต้องสิ้นเปลืองระบบสายส่งไกลๆแต่เนื่องจากความเข้มของแสงทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นจึงส่งผลให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ลดลง 20% งานวิจัยนี้จึงได้มีการใช้ฮีทซิงค์และเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลเพื่อนำมาระบายความร้อนให้กับเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อให้เซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพในการทำงานดีขึ้น เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลเป็นอุปกรณ์ที่อาศัยหลักการของปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริก ซึ่งถูกนำมาใช้เป็นอุปกรณ์ทำความเย็นหรือถูกนำมาใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการผลิตกำลังไฟฟ้าของระบบรวมเซลล์แสงอาทิตย์และเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลโดยใช้เซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกเดี่ยว และใช้เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลรุ่นDT12-6 จำนวน4ตัว เชื่อมต่อกันแบบอนุกรม มีการเลือกใช้หลอดไฟ BEC Halogen FloodlightCQ500Dขนาด500Wเป็นแหล่งกำเนิดแสง โดยกำหนดให้ระยะห่างที่เหมาะสมและมีค่าความเข้มแสงใกล้เคียงกับความเข้มแสงมาตรฐาน A.M. 1.5 ซึ่งเป็นค่าความเข้มแสงที่วัดบนพื้นผิวโลก (1000วัตต์ต่อตารางเมตร)คือระยะห่างที่ 24.5 เซนติเมตร โดยใช้ไพรานอมิเตอร์ในการวัดความเข้มของแสงและทำการทดสอบค่าความแตกต่างอุณหภูมิของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลและประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลตามลำดับ

### 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาและเข้าใจหลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์และเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล
- 1.2.2 เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของระบบรวมเซลล์แสงอาทิตย์และเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล
- 1.2.3 สามารถคำนวณหาค่าประสิทธิภาพของระบบรวมเซลล์แสงอาทิตย์และเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลได้

### 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 ทดสอบประสิทธิภาพในการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์และเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล
- 1.3.2 วิเคราะห์ เปรียบเทียบค่าความเข้มแสงและสเปกตรัมของแสงอาทิตย์จากแหล่งกำเนิดแสง หาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด( Maximum Power Point) ฟิลแฟกเตอร์ (Fill Factor) และประสิทธิภาพ(Efficiency) ของเซลล์แสงอาทิตย์และเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล
- 1.3.3 ทดสอบค่าความแตกต่างของอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยข้อมูลจะถูกแปลงผ่านอุปกรณ์Data Acquisition (DAQ)เป็นระบบจัดเก็บข้อมูลอัตโนมัติ ประกอบด้วย NI 9201 NI 9211 และ NI 9227
- 1.3.4 ทำการติดตั้งรวมระบบเซลล์แสงอาทิตย์และเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลโดยใช้ฮีทซิงค์ระบายความร้อนเพื่อหาค่าประสิทธิภาพ (Efficiency) ของระบบรวม

### 1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ตารางที่1.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

| ระยะเวลา               | ขั้นตอนดำเนินงาน                                                                                                                                                                                                                                         |
|------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| กรกฎาคม 2557           | ศึกษาหลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์และเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล                                                                                                                                                                                             |
| สิงหาคม 2557           | ศึกษาระบบรวมเซลล์แสงอาทิตย์และเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลโดยใช้ฮีทซิงค์ระบายความร้อน                                                                                                                                                                          |
| กันยายน-ตุลาคม 2557    | ทำการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลองเช่น เปรียบเทียบค่าความเข้มแสงและสเปกตรัมของแสงอาทิตย์จากแหล่งกำเนิดแสงหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด ( Maximum Power Point) ฟิล แฟ ก เต อ ร์ (Fill Factor)และ ประสิทธิภาพ(Efficiency)ของเซลล์แสงอาทิตย์และเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล |
| พฤศจิกายน-ธันวาคม 2557 | ทำการติดตั้งรวมระบบเซลล์แสงอาทิตย์และเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลโดยใช้ฮีทซิงค์ระบายความร้อน เพื่อหาค่าประสิทธิภาพ(Efficiency) ของระบบรวม                                                                                                                      |
| มกราคม-กุมภาพันธ์ 2558 | วิเคราะห์ผลการทดลอง                                                                                                                                                                                                                                      |
| มีนาคม 2558            | -สรุปผลงานวิจัย<br>-จัดทำรูปเล่ม                                                                                                                                                                                                                         |

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 ทำให้ทราบเกี่ยวกับหลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์และเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล
- 1.5.2 สามารถหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด(Maximum Power Point), ฟิลแฟกเตอร์ (Fill Factor)และประสิทธิภาพ(Efficiency)ของเซลล์แสงอาทิตย์และเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล
- 1.5.3 สามารถนำฮีทซิงค์ไปใช้ในระบบระบายความร้อนให้กับระบบรวมได้
- 1.5.4 ผลสำเร็จของงานวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนได้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาความเป็นไปได้ของระบบผลิตไฟฟ้าร่วมของเซลล์แสงอาทิตย์และเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล โดยศึกษาคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ อาทิ เช่น ต้นกำเนิดของเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิดของเซลล์แสงอาทิตย์ และหลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ นอกจากนี้ยังมีการศึกษาหลักการทำงานของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่อาศัยหลักการของปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริก ซึ่งปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริกเป็นปรากฏการณ์การเปลี่ยนรูประหว่างพลังงานความร้อนและพลังงานไฟฟ้า รวมไปถึงการระบายความร้อนให้กับระบบรวม โดยใช้ ฮีทซิงค์(Heat Sink) เป็นต้น ซึ่งรายละเอียดต่างๆจะอธิบายต่อไป

#### 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาคุณสมบัติและหลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์และเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล มีการนำเซลล์แสงอาทิตย์และเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลไปปรับเปลี่ยนและพัฒนาาระบบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ไม่ว่าจะเป็นงานวิจัยเซลล์แสงอาทิตย์ไฮบริดใหม่และแผงเทอร์โมอิเล็กทริก (M.M.M. Daud และคณะ,2555) ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้มีการตระหนักถึงปัญหาการขาดแคลนทรัพยากรทางธรรมชาติ โดยเฉพาะทรัพยากรทางด้านพลังงาน จึงได้มีการนำพลังงานแสงอาทิตย์ซึ่งถือว่าเป็นพลังงานที่สะอาด บริสุทธิ์และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมาสร้างเป็นพลังงานทดแทนรูปแบบใหม่ โดยใช้เซลล์แสงอาทิตย์และเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลในการแปลงให้เป็นพลังงานไฟฟ้าเพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ ระบบผลิตกำลังไฟฟ้าร่วมเซลล์แสงอาทิตย์และเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลแบบไม่มีระบบระบายความร้อนและแบบมีระบบระบายความร้อน จากค่าความเข้มรังสีของดวงอาทิตย์ จากผลการศึกษาข้างต้น พบว่า เมื่อความเข้มรังสีของดวงอาทิตย์เพิ่มมากขึ้นถึง  $627.02\text{W/m}^2$  ประสิทธิภาพที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าลดลงเหลือ 6.764 % ระบบผลิตกำลังไฟฟ้าร่วมเซลล์แสงอาทิตย์และเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลแบบไม่มีระบบระบายความร้อนมีค่าลดลงเหลือ 7.551%ในขณะเดียวกัน ประสิทธิภาพที่ได้จากระบบผลิตกำลังไฟฟ้าร่วมเซลล์แสงอาทิตย์และเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลแบบมีระบบระบายความร้อนก็ยังมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเหลือ 8.82% เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ นอกจากนี้ยังมีงานวิจัย การศึกษาความเป็นไปได้ของระบบผลิตกำลังไฟฟ้าร่วมเซลล์แสงอาทิตย์และเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล (W.G.J.H.M. van Sark และคณะ,2554)ซึ่งในงานวิจัยนี้ ได้มีการศึกษาการผลิตกำลังไฟฟ้า 2 แบบ คือ การเปลี่ยนความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์เป็นกระแสไฟฟ้าโดยใช้เซลล์แสงอาทิตย์และการเปลี่ยนความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นกระแสไฟฟ้าโดยใช้เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล โดยผู้วิจัยได้นำการผลิตไฟฟ้าทั้ง 2 แบบมารวมกันเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิต

กำลังไฟฟ้า จากการศึกษาพบว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อติดตั้งกลางแจ้งจะมีประสิทธิภาพลดลงถึง 20% เนื่องจากความเข้มรังสีและอุณหภูมิเพิ่มขึ้น อีกทั้งการลดลงของประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ยังขึ้นอยู่กับรูปแบบการติดตั้งและการนำเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลมาผลิตกระแสไฟฟ้า โดยพลั๊กความร้อนที่เหลือจากเซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงขึ้น โดยจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ตกคร่อมของเทอร์โมอิเล็กทริก ในงานวิจัยนี้ได้มีการใช้ค่า Figure of Merit ( $Z$ ) = 0.004 ที่อุณหภูมิ 300 K เมื่อนำไปคำนวณหาค่าประสิทธิภาพ พบว่าประสิทธิภาพที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้น 8.23% จากงานวิจัยที่กล่าวมาทั้งหมดข้างต้น สามารถนำไปปรับปรุง เปลี่ยนแปลง และพัฒนาระบบผลิตกำลังไฟฟ้าเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานของการศึกษาความเป็นไปได้ของระบบผลิตไฟฟ้าร่วมเซลล์แสงอาทิตย์และเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลต่อไป

## 2.2 ทฤษฎี

### 2.2.1 เซลล์แสงอาทิตย์

#### 2.2.1.1 ต้นกำเนิดเซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์มีต้นกำเนิดในช่วงปี ค.ศ. 1954 ประเทศสหรัฐอเมริกา นักวิทยาศาสตร์ชาวอเมริกัน 3 ท่าน ประกอบด้วย แชปปีน (Chapin) ฟูลเลอร์ (Fuller) และเพียร์สัน (Pearson) แห่งห้องปฏิบัติการวิจัยเบลล์เทเลโฟน (Bell Telephone Laboratory) ประเทศสหรัฐอเมริกาได้ค้นพบเทคโนโลยีการสร้างรอยต่อ พี-เอ็น (P-N junction) แบบใหม่โดยใช้วิธีการแพร่สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) เข้าไปในผลึกของซิลิกอน (Silicon) และเมื่อนำแผ่นเซลล์นี้ไปปรับแสงแดดพบว่าจะมีไฟฟ้ากระแสตรงไหลผ่านรอยต่อพี-เอ็น แผงเซลล์ที่วุ้นือเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชิ้นแรกของโลก และจากการวัดประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าในการค้นพบครั้งแรก เซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพเพียงร้อยละ 6 เท่านั้น กล่าวคือเมื่อได้รับพลังงานแสงอาทิตย์จำนวน 100 วัตต์ เซลล์แสงอาทิตย์ดังกล่าวสามารถผลิตกำลังไฟฟ้ากระแสตรงออกมาเพียง 6 วัตต์ขณะที่ปัจจุบันนี้เซลล์แสงอาทิตย์ได้ถูกพัฒนาขึ้นจนมีประสิทธิภาพสูงกว่าร้อยละ 15

เซลล์แสงอาทิตย์เป็นอุปกรณ์ทางไฟฟ้าที่ทำจากสารกึ่งตัวนำ ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานแสงเป็นไฟฟ้าโดยตรงโดยอาศัยกระบวนการโฟโตโวลตาอิก (Photovoltaic Effect) ซึ่งเกิดจากความต่างศักย์ไฟฟ้าภายในสารกึ่งตัวนำเมื่อมีค่าแตกต่างกัน หากได้รับแสงที่มีพลังงานมากพอจะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระ

#### 2.2.1.2 ชนิดของเซลล์แสงอาทิตย์

โครงสร้างที่สำคัญของเซลล์แสงอาทิตย์มีลักษณะเหมือนกับไดโอดทั่วไป ประกอบด้วยรอยต่อระหว่างวัสดุสารกึ่งตัวนำต่างชนิดกันสองชั้น ได้แก่สารกึ่งตัวนำชนิดพีเป็นขั้วบวก และสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นเป็นขั้วลบเซลล์แสงอาทิตย์ที่พัฒนาและใช้งานในปัจจุบันนั้นส่วนใหญ่ทำจากธาตุซิลิกอนซึ่งเป็นธาตุที่มีมากเป็นอันดับสองบนโลกรองจากออกซิเจน สามารถจำแนกเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดต่างๆ โดยแบ่งตามโครงสร้างได้ 3 แบบคือ

#### 2.2.1.2.1. เซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกชนิดผลึกเดี่ยว (Single Crystalline Silicon Solar Cell)

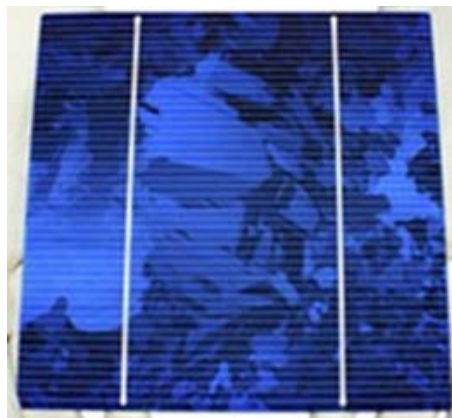
ลักษณะเป็นแผ่นซิลิกอนแข็งและบางมากดังรูปที่ 2.1 ซิลิกอนเป็นธาตุที่มีมากที่สุดในโลกชนิดหนึ่ง สามารถถลุงได้จากหินและทราย เรานิยมใช้ธาตุซิลิกอนในงานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ เช่น ใช้ทำทรานซิสเตอร์และไอซี และเซลล์แสงอาทิตย์ เทคโนโลยี C-Si ได้รับความนิยมและใช้งานกันอย่างแพร่หลายนิยมใช้งานในพื้นที่เฉพาะได้แก่ ในชนบทที่ไม่มีไฟฟ้าใช้เป็นหลัก



รูปที่ 2.1 เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากซิลิกอน ชนิดผลึกเดี่ยว

#### 2.2.1.2.2. เซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึก ชนิดผลึกโพลี (Polycrystalline)

เซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกชนิดผลึกโพลีได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อแก้ปัญหาต้นทุนสูงของแบบผลึกเดี่ยวซิลิกอนแบบผลึกโพลีหรือโพลีซิลิกอนก็คือก้อนซิลิกอนเกิดจากการรวมตัวกันของชิ้นเล็กๆ ของผลึกเดี่ยวของซิลิกอน ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 เซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึก ชนิดผลึกโพลี

### 2.2.1.2.3. เซลล์แสงอาทิตย์แบบอะมอร์ฟัสซิลิกอน (Amorphous Silicon Solar Cell)

ลักษณะเป็นฟิล์มบางเพียง 0.5 ไมครอน (0.0005 มม.) น้ำหนักเบาและมีประสิทธิภาพเพียง 5-10% เป็นเทคโนโลยีที่ใช้ธาตุซิลิกอนเช่นกันแต่ไม่เป็นผลึก ผลของสารอะมอร์ฟัสจะทำให้เกิดเป็นฟิล์มบางของซิลิกอนซึ่งมีความบางประมาณ 300 นาโนเมตรทำให้ไม่สิ้นเปลืองเนื้อวัสดุ น้ำหนักเบา การผลิตทำได้ง่าย และข้อดีของเซลล์แสงอาทิตย์แบบอะมอร์ฟัสซิลิกอนคือไม่เกิดมลพิษกับสิ่งแวดล้อม จึงเหมาะที่จะประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าที่กินไฟฟ้าน้อย เช่น เครื่องคิดเลข นาฬิกาข้อมือ วิทยุทรานซิสเตอร์ เป็นต้น



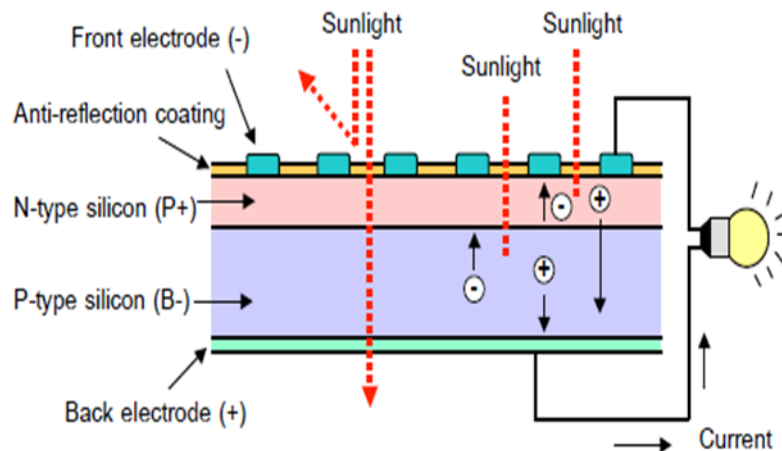
รูปที่ 2.3 เซลล์แสงอาทิตย์แบบอะมอร์ฟัสซิลิกอน

### 2.2.1.3 หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์ประกอบไปด้วยสารกึ่งตัวนำ 2 ชนิดคือ n-type ซิลิกอน เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีการโด๊ปด้วยฟอสฟอรัส(P) มีคุณสมบัติเป็นตัวให้อิเล็กตรอน p-type ซิลิกอน เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีการโด๊ปด้วยโบรอน(Br) มีคุณสมบัติเป็นตัวรับอิเล็กตรอน เมื่อนำทั้ง 2 ชนิดมาประกบต่อกันด้วย p-n junction ทำให้เกิดเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ โดยในสภาวะที่ยังไม่มีแสงแดด n-type ซิลิกอนซึ่งอยู่ด้านหน้าของเซลล์โดยส่วนประกอบส่วนใหญ่พร้อมจะให้อิเล็กตรอนแต่ก็ยังมิโฮลปะปนอยู่บ้างเล็กน้อย ด้านหน้าของ n-type จะมีแถบโลหะเรียกว่า Front Electrode ทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอน ส่วน p-type ซิลิกอนซึ่งอยู่ด้านหลังของเซลล์ โครงสร้างส่วนใหญ่เป็นโฮล แต่ยังคงมีอิเล็กตรอนปะปนบ้างเล็กน้อย ด้านหลังของ p-type ซิลิกอนจะมีแถบโลหะเรียกว่า Back Electrode ทำหน้าที่เป็นตัวรวบรวมโฮล

เมื่อมีแสงอาทิตย์ซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์และมีพลังงานกระทบกับสารกึ่งตัวนำ จะเกิดการสร้างพาหะนำไฟฟ้าประจุลบและบวกขึ้น ได้แก่ อิเล็กตรอนและ โฮล โครงสร้างรอยต่อพีเอ็นจะทำหน้าที่สร้างสนามไฟฟ้าภายในเซลล์เพื่อแยกพาหะนำไฟฟ้าชนิดอิเล็กตรอนไปที่ขั้วลบและพาหะนำไฟฟ้าชนิดโฮลไปที่ขั้วบวก ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าแบบกระแสตรงที่ขั้วไฟฟ้าทั้งสอง อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปรวมกันที่ Front Electrode และโฮลเคลื่อนที่ไปรวมกันที่ Back Electrode เมื่อมีการต่อวงจรไฟฟ้าจาก Front Electrode และ Back Electrode ให้ครบวงจรแล้วจะเกิดการถ่ายทอดพลังงานระหว่างกันเมื่อได้พลังงานสูงพอทั้งอิเล็กตรอนและโฮลจะ

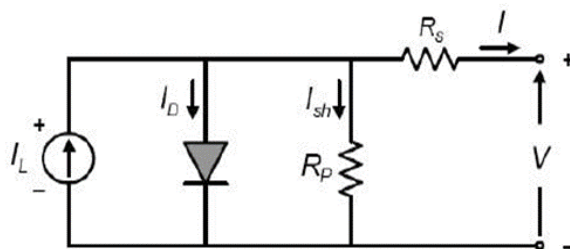
เคลื่อนที่เข้าหากันเพื่อจับคู่ โดยอิเล็กตรอนจะวิ่งไปยังชั้น n-type และโฮลจะวิ่งไปยังชั้น p-type จึงทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้นดังรูปที่2.4



รูปที่2.4 การทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์

#### 2.2.1.4 ลักษณะกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์

โดยทั่วไปสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์แสดงรูปความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้า เริ่มที่วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ดังรูปที่ 2.5 เป็นการต่อขนานระหว่างแหล่งกำเนิดแสง ไดโอด(รอยต่อพี-เอ็น)และความต้านทานขนั้ท์และต่ออนุกรมกับความต้านทานอนุกรมตามลำดับ นั่นคือผลกระแสที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ที่เกิดมาจากแหล่งพลังงานหักลบด้วยกระแสที่ไหลผ่านไดโอดและผ่านความต้านทานขนั้ท์ขณะกระแสไฟฟ้าไหลผ่านทำให้เกิดค่าแรงดันไฟฟ้าในแต่ละจุดขึ้น



รูปที่2.5 การต่อวงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์

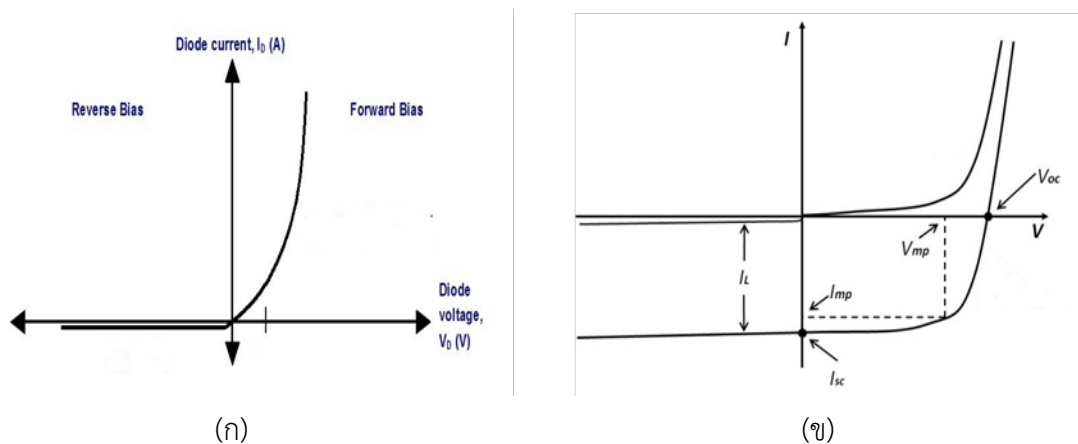
ค่ากระแสที่ผลิตจากเซลล์จะมีความสัมพันธ์กับกระแส  $I_L$  และ  $I_D$  ดังความสัมพันธ์

$$I = I_D - I_L \quad (1)$$

เมื่อแทนค่า  $I_D$  จะได้สมการ

$$I = I_0 \left[ \exp\left(\frac{qV}{\gamma kT}\right) - 1 \right] - I_L \quad (2)$$

สมการนี้แสดงให้เห็นว่ากราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าจะเลื่อนต่ำลงมาในกรณีที่เซลล์ได้รับแสงและผลิตกระแสเท่ากับ  $I_L$  ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 กราฟแสดง I-V (ก) ในสภาวะมืด (ข) ในสภาวะถูกฉายแสง

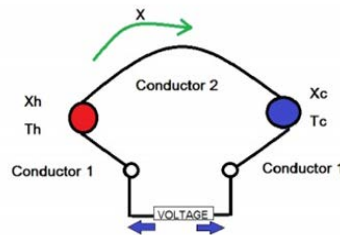
พารามิเตอร์ที่บ่งบอกประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ประกอบด้วยกระแสลัดวงจร ( $I_{sc}$ ) แรงดันวงจรเปิด ( $V_{oc}$ ) และฟิลต์แฟกเตอร์ (FF) กราฟกระแสกับแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อเทียบกับโหลดที่แปรค่าตั้งแต่สภาวะลัดวงจร ถึงสภาวะวงจรเปิด โดยตัดแกนตั้งที่แรงดันเป็นศูนย์ จะได้ค่ากระแสที่สภาวะลัดวงจร (Short circuit :  $I_{sc}$ ) ส่วนจุดตัดแกนนอนที่กระแสเท่ากับศูนย์จะได้ค่าแรงดันขณะวงจรเปิด (Open circuit voltage :  $V_{oc}$ ) เมื่อนำค่ากระแสคูณกับแรงดันก็จะได้กำลังของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งต้องมีจุดเดียวเป็นค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด เรียกว่า กำลังไฟฟ้าที่จุดสูงสุด (Power at Maximum Point :  $P_{MP}$ ) แรงดันที่จุดนี้เรียกว่า กระแสที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Current at Maximum Power point :  $I_{MP}$ ) กับแรงดันที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Voltage at maximum power point :  $V_{MP}$ ) นอกจากนี้พารามิเตอร์เกี่ยวกับความต้านทานในเซลล์แสงอาทิตย์เป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ โดยจะคิดจากสัดส่วนระหว่างค่าแรงดันวงจรเปิดต่อกระแสลัดวงจร

## 2.2.2 เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล

เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลจัดเป็นอุปกรณ์ที่อาศัยหลักการของปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริกซึ่งถูกนำมาใช้เป็นอุปกรณ์ทำความเย็นหรือถูกนำมาใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าวัสดุที่จะนำมาใช้เป็นอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริกที่ได้นั้นตามหลักควรจะเป็นวัสดุที่มีค่าการเหนี่ยวนำไฟฟ้าต่ออุณหภูมิที่สูงหรือมีค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคมาก ซึ่งคือวัสดุประเภทโลหะกับสารกึ่งตัวนำเนื่องจากมีประจุไฟฟ้าอิสระมากและมีความต้านทานไฟฟ้าต่ำเป็นสื่อนำที่ได้เพื่อไม่ให้เกิดการสูญเสียพลังงานโดยการเปลี่ยนคืนเป็นความร้อน

### 2.2.2.1 ปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric Effect)

ปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริก (thermoelectric effect) เป็นปรากฏการณ์การเปลี่ยนรูประหว่างพลังงานความร้อนและพลังงานไฟฟ้า ความรู้เกี่ยวกับปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริกเริ่มต้นขึ้นในปี ค.ศ.1821 โดย Thomas Johann Seebeck นักฟิสิกส์ชาวเยอรมันค้นพบว่า เมื่อเกิดความแตกต่างของอุณหภูมิบริเวณรอยต่อของตัวนำ (Conductor) สองชนิด จะเกิดแรงดันและเกิดกระแสไฟฟ้าไหลขึ้นภายในตัวนำเมื่อเป็นวงจรมอด ซึ่งเรียกว่าปรากฏการณ์ซีเบค (Seebeck Effect)



รูปที่ 2.7 วงจรการเกิดปรากฏการณ์ซีเบค

จากรูปที่ 2.8 เส้นลวดโลหะสองชนิด (Conductor 1 และ Conductor 2) ถูกเชื่อมต่อโดยจุดเชื่อมต่อ  $X_h$  ซึ่งมีอุณหภูมิสูง ( $T_h$ ) และจุด  $X_c$  ซึ่งมีอุณหภูมิต่ำ ( $T_c$ ) พาหะไฟฟ้า (Carrier) ในตัวนำจะมีทิศทางการแพร่ไปในทิศทางเดียวกันกับการถ่ายเทอุณหภูมิตามทิศทาง  $x$  ที่บริเวณฝั่งด้านร้อน พาหะจะมีพลังงานสูงจึงพยายามแพร่ไปหาด้านที่เย็นกว่าเพื่อลดพลังงานลงทำให้พาหะไฟฟ้าอยู่ในภาวะสมดุล เนื่องจากลวดตัวนำทั้งสองเป็นโลหะต่างชนิดกันจึงมีค่าสัมประสิทธิ์การเหนี่ยวนำไฟฟ้าต่ออุณหภูมิไม่เท่ากันและทำให้เกิดแรงดันคร่อมจุดเชื่อมต่อทั้งสอง สมการ (3) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ต่างกันของจุดต่อทั้งสองกับแรงดันที่เกิดขึ้น

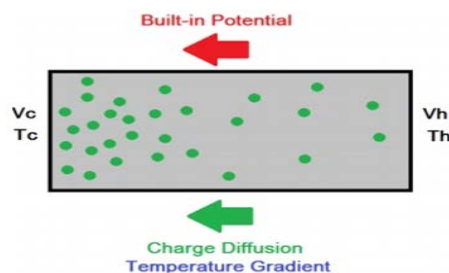
$$V = (S_2 - S_1) \Delta T \quad (3)$$

$V$  คือ แรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างจุดต่อทั้งสอง ( $V$ )

$S$  คือ สัมประสิทธิ์ซีเบคหรือค่าการเหนี่ยวนำไฟฟ้าต่ออุณหภูมิของโลหะชนิดต่างๆ ( $V/K$ )

$\Delta T$  คือ ผลต่างของอุณหภูมิที่จุดต่อทั้งสอง ( $K$ )

ค่า  $S$  จะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ คือ อุณหภูมิ โครงสร้างอะตอม และชนิดของตัวนำซึ่งหากใช้ตัวนำต่างชนิดจะได้ค่า  $S$  ไม่เท่ากันทำให้  $V$  ที่ได้จะมีค่าไม่เป็นศูนย์อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกในยุคปัจจุบันจะใช้สารกึ่งตัวนำมาผ่านกระบวนการโด๊ป เพื่อให้ได้เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นคือสารกึ่งตัวนำที่มีอิเล็กตรอน (ประจุลบ) เป็นพาหะข้างมาก และชนิดพีคือสารกึ่งตัวนำที่มีโฮล (ประจุบวก) เป็นพาหะข้างมาก



รูปที่ 2.8 ภาพการเคลื่อนที่ของพาหะข้างมากในสารกึ่งตัวนำที่มีอุณหภูมิสองด้านไม่เท่ากัน

พาหะข้างมากของสารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดจะมีทิศทางการแพร่เป็นไปตามรูปที่ 2.8 คือพาหะมีการไหลตามทิศทางการถ่ายเทอุณหภูมิจากอุณหภูมิสูงไปยังอุณหภูมิต่ำ การแพร่ของพาหะข้างมากจะเกิดการไหลของกระแสกรณีพาหะข้างมากเป็นอิเล็กตรอน กระแสจะไหลในทิศสวนทางกับการแพร่ในภาพที่ 2.8 ไหลจากซ้ายไปขวา หากพาหะข้างมากเป็นโฮลกระแสที่เกิดขึ้นจะไหลทิศทางเดียวกันกับการแพร่ในภาพที่ 2.8 จะไหลจากขวาไปซ้าย และแรงดันที่เกิดขึ้นระหว่างด้านทั้งสองที่มีอุณหภูมิแตกต่างกันสามารถอธิบายเป็นความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$S = -\frac{\Delta V}{\Delta T} = -\frac{V_h - V_c}{T_h - T_c} \quad (4)$$

$V_h$  = แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากด้านร้อน (V)

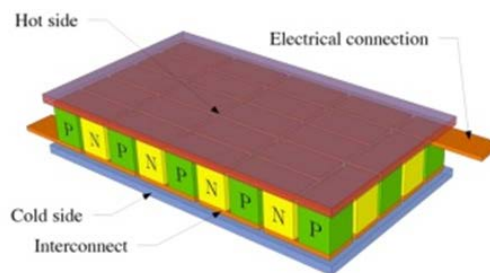
$V_c$  = แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากด้านเย็น (V)

$T_h$  = อุณหภูมิด้านร้อน (K)

$T_c$  = อุณหภูมิด้านเย็น (K)

$S$  = Seebeck Coefficient (V/K)

#### 2.2.2.2 โครงสร้างของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล



รูปที่ 2.9 โครงสร้างภายในของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล

จากภาพที่ 2.9 จะเห็นว่าสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและชนิดพีจะอยู่แบบเรียงกันเป็นคู่ มีโลหะนำไฟฟ้าเป็นจุดเชื่อมระหว่างสารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิด

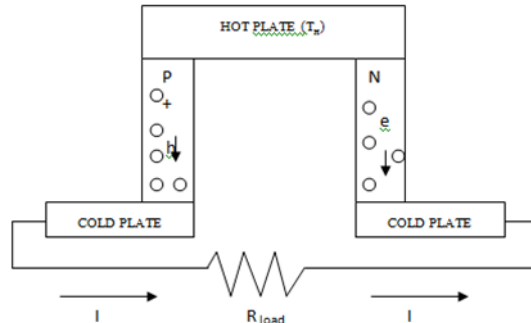
#### 2.2.2.3 หลักการทำงานของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล

เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลสามารถทำงานได้สองแบบคือ โหมดผลิตไฟฟ้าและโหมดผลิตความเย็นด้วยไฟฟ้า

##### 2.2.2.3.1 โหมดผลิตไฟฟ้า (Generator mode)

ความต่างของอุณหภูมิตั้งแต่บนแผ่นเซรามิคด้านบนและล่างทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลเนื่องจากพาหะเอ็นและพีในสารกึ่งตัวนำเหล่านั้น ในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นซึ่งมีพาหะข้างมากเป็นอิเล็กตรอน (Electron) หรือประจุลบ เมื่อมีความร้อนที่ผิวด้านบนมากกว่าด้านล่าง การไหลของความร้อนจะทำให้เกิดการไหลของพาหะข้างมากเหล่านั้น อิเล็กตรอนจะไหลจากผิวด้านบนไปสู่

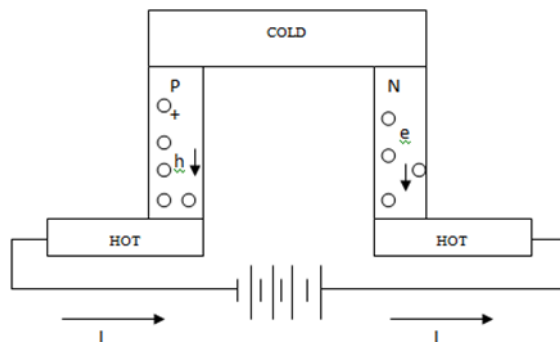
ด้านล่าง ส่วนในสารกึ่งตัวนำชนิดพีมีพาหะข้างมากเป็นโฮล (Hole) หรือประจุบวก เมื่อมีความร้อนที่ผิวด้านบนมากกว่าด้านล่าง โฮลก็จะไหลจากผิวด้านบนไปด้านล่างเช่นเดียวกัน ดังนั้นทิศทางการเคลื่อนที่ของพาหะข้างมากซึ่งเป็นตัวทำให้เกิดการนำความร้อนจากด้านบนหนึ่งไปอีกด้านหนึ่ง



รูปที่ 2.10 ภาพตัดขวางแสดงโหมดผลิตกระแสไฟฟ้า

#### 2.2.2.3.2 โหมดผลิตความเย็นด้วยกระแสไฟฟ้า (Refrigerator mode)

ในทางกลับกันเมื่อกระแสไฟฟ้าผ่านเข้าไปในเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลจะทำให้เกิดความร้อนและความเย็นเกิดขึ้นที่ผิวด้านบนและด้านล่างเมื่อมีแหล่งจ่ายไฟฟ้าจากภายนอก เช่น แบตเตอรี่ จะทำให้เกิดความแตกต่างของความร้อนและความเย็นที่ผิวแต่ละด้านเนื่องจากกระแสไฟฟ้าทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของพาหะข้างมากซึ่งเป็นตัวทำให้เกิดการนำความร้อนจากด้านบนหนึ่งไปอีกด้านหนึ่ง



รูปที่ 2.11 ภาพตัดขวางแสดงโหมดผลิตความเย็นด้วยกระแสไฟฟ้า

#### 2.2.3 การระบายความร้อน (Heat Rejection)

การระบายความร้อน เป็นเรื่องที่สำคัญมากสำหรับการผลิตไฟฟ้าด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล เพราะกระแส แรงดันและพลังงานที่จะได้จากเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลล้วนขึ้นอยู่กับความแตกต่างของอุณหภูมิทั้งสองด้านของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล ดังนั้นถ้าการระบายความร้อนไม่ดี อุณหภูมิทั้งสองข้างของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลมีค่าใกล้เคียงกันเป็นเหตุให้เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลสามารถผลิตไฟฟ้าออกมาได้เป็นพลังงานได้น้อย และมีประสิทธิภาพต่ำเมื่อเทียบกับพลังงานความร้อนที่ใส่เข้าไป

ลักษณะของการเคลื่อนที่ของความร้อนแบ่งเป็น 3 แบบ โดยลักษณะการเคลื่อนที่ของความร้อนทั้ง 3 แบบนี้ จะทำให้เราสามารถมองภาพการทำงานของระบบการระบายความร้อนได้ง่ายยิ่งขึ้น และมีความเข้าใจมากขึ้นว่าหลักการทำงานที่แท้จริงของอุปกรณ์ระบายความร้อนมีปัจจัยอะไรบ้าง ต้องคำนึงถึงองค์ประกอบใดบ้างเพื่อที่อุปกรณ์หรือระบบระบายความร้อนนั้นๆจะได้มีประสิทธิภาพสูงสุดในการใช้งาน โดยลักษณะของการเคลื่อนที่ของความร้อนจะเป็นดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ลักษณะของการเคลื่อนที่ของความร้อน

1.การแผ่รังสี (Radiation) เป็นการเคลื่อนที่ของความร้อนออกจากตัวเองในทุกทิศทุกทาง เมื่อรังสีความร้อนไปกระทบกับวัตถุอื่น บางส่วนของความร้อนจะสะท้อนออกมา และบางส่วนจะถูกวัตถุนั้นดูดกลืนเอาไว้

2.การพาความร้อน (Convection) คือการเคลื่อนที่ของความร้อนในของไหล (ก๊าซหรือของเหลว) โดยที่โมเลกุลของของไหลที่เคลื่อนที่จะนำพาเอาความร้อนไปด้วย ในขณะที่เดียวกันในโมเลกุลของของไหลที่เคลื่อนที่นั้นก็เกิดการนำความร้อนเกิดขึ้นด้วย

3.การนำความร้อน (Conduction) คือการเคลื่อนที่ของความร้อนในของแข็ง ส่วนมากจะเป็นวัตถุในแบบทึบแสง การนำความร้อนนั้นจะเกิดขึ้นเมื่อมีความแตกต่างของอุณหภูมิและพลังงานจลน์ โดยที่ความร้อนเคลื่อนที่จากโมเลกุลหนึ่งไปยังอีกโมเลกุลหนึ่งในขณะที่โมเลกุลของสารดังกล่าวไม่มีการเคลื่อนที่ไปจากตำแหน่งเดิม

จากลักษณะการเคลื่อนที่ของความร้อนทั้งสามรูปแบบนั้นอาจจะเกิดขึ้นได้พร้อมกันในเวลาเดียวกัน โดยทั้งหมดนี้คือกลไกของการถ่ายเทความร้อนซึ่งเกี่ยวข้องกับการระบายความร้อน

เพราะการถ่ายเทความร้อนเป็นที่มาของการระบายความร้อนซึ่งจะมีผลต่ออุปกรณ์ระบายความร้อนอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้

#### 2.2.3.1 ประเภทของการระบายความร้อน

การระบายความร้อนที่เป็นที่นิยมใช้ในปัจจุบันนี้มีอยู่ 2 รูปแบบ คือ

##### 2.2.3.1.1 การระบายความร้อนด้วยอากาศ (Passive)

ในการระบายความร้อนด้วยอากาศนั้นก็จะมีหลักการคือจะมีอุปกรณ์ที่เรียกว่า ฮีทซิงค์ ซึ่งจะทำหน้าที่ช่วยในการถ่ายเทความร้อนจากแหล่งกำเนิดให้มีอุณหภูมิลดต่ำลงเป็นตัวกลางที่ทำหน้าที่ดึงความร้อนมาถ่ายเทให้กับอากาศรอบข้างเพื่อที่จะทำให้อุณหภูมิลดลงในการระบายความร้อนด้วยอากาศจะพบได้ว่าลักษณะการระบายความร้อนในลักษณะนี้มักเป็นที่นิยมกันอย่างแพร่หลายด้วยการใช้งานที่ง่ายไม่ยุ่งยากทั้งการติดตั้งและการบำรุงรักษา โดยประสิทธิภาพที่ออกมาขึ้นขึ้นอยู่กับความสามารถของผู้ออกแบบและเทคนิคเทคโนโลยีที่นำมาใช้ส่วนหลักการระบายความร้อนด้วย

อากาศใช้หลักการจากการเคลื่อนที่ของความร้อนทั้ง3รูปแบบ คือ การนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสี ในบางครั้งก็อาจจะใช้เพียง2รูปแบบเท่านั้นคือ การนำความร้อน และการแผ่รังสี

#### 2.2.3.1.2การระบายความร้อนด้วยของเหลว (Active)

เป็นกระบวนการระบายความร้อนที่มีประสิทธิภาพสูงเมื่อเทียบกับการระบายความร้อนด้วยอากาศ (Passive) แต่เนื่องด้วยมีข้อจำกัดบางประการจึงทำให้ยังไม่เป็นที่นิยมนำมาใช้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มากนัก การทำงานของระบบระบายความร้อนด้วยของเหลวมีหลักการทำงานเช่นเดียวกับระบบระบายความร้อนด้วยอากาศแต่เป็นการเปลี่ยนสารตัวกลางที่ทำหน้าที่นำพาความร้อนจากเดิมที่เป็นอากาศมาเป็นของเหลวแทน แต่ทางด้านของรูปทรงและองค์ประกอบทั้งหมดนั้นจะแตกต่างกันออกไปอย่างสิ้นเชิง จุดแตกต่างที่เห็นได้เด่นชัดที่สุดคือระบบระบายความร้อนด้วยของเหลวจะประกอบขึ้นด้วยองค์ประกอบที่ทำงานแยกออกเป็นส่วนๆกันอย่างอิสระ

#### 2.2.3.2 หลักการทำงานของฮีทซิงค์ (Heat Sink)

ฮีทซิงค์ (Heat Sink) เป็นอุปกรณ์เพิ่มความเย็นหรือระบายความร้อนออกจากตัวอุปกรณ์โดยอาศัยหลักของอุณหพลศาสตร์ คือ พลังงานที่อุณหภูมิสูงจะไหลไปหาอุณหภูมิต่ำโดยมากทำมาจากวัสดุประเภทโลหะ ประสิทธิภาพของฮีทซิงค์ขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนและพื้นที่ผิวสัมผัส ถ้าหากมีพื้นที่ผิวสัมผัสมากก็จะสามารถส่งถ่ายพลังงานความร้อนได้มาก พลังงานความร้อนที่ระบายได้จะสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$P = \frac{kA\Delta T}{d} \quad (5)$$

$P$  = พลังงานความร้อนที่ระบายมาได้ ใน 1วินาที (W)

$k$  = สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (W/m)

$A$  = พื้นที่หน้าตัดของผิวสัมผัสของวัสดุ ( $m^2$ )

$d$  = ความหนาของวัสดุ (m)

$\Delta T$  = ผลต่างของอุณหภูมิที่จุดต่อทั้งสอง (K)

ฮีทซิงค์ (Heat Sink) จะใช้วิธีการพาความร้อนจากตัวอุปกรณ์สู่สิ่งแวดล้อมโดยเพิ่มพื้นที่สัมผัสอากาศทำให้การพาความร้อนจากตัวอุปกรณ์สู่อากาศโดยรอบทำได้เร็วฮีทซิงค์ส่วนมากจะทำมาจากอลูมิเนียม เนื่องจากคุณสมบัติและราคาของอลูมิเนียมอยู่ในระดับที่เหมาะสมในการจะนำมาใช้ โดยหากเป็นอลูมิเนียม 100%จะมีคุณสมบัติในการนำความร้อนที่ดีกว่าชนิดที่เป็นอัลลอยด์ อย่างไรก็ตามผู้ผลิตฮีทซิงค์ส่วนใหญ่ก็ยังคงเลือกที่จะใช้แบบอัลลอยด์ เนื่องมาจากลักษณะเฉพาะตัวที่ดีกว่า อาจมีฮีทซิงค์บางตัวที่ทำมาจากทองแดงซึ่งจะทำให้ฮีทซิงค์นั้นมีคุณสมบัติทางด้านการดูดซับความร้อนดีกว่าฮีทซิงค์ที่ทำจากอลูมิเนียมเกือบ2เท่า แต่ฮีทซิงค์ที่ทำด้วยทองแดงนั้นกลับไม่ค่อยได้รับความนิยม สาเหตุหนึ่งมาจากการที่โลหะทองแดงนั้นมีราคาแพงถ้าเทียบกับอลูมิเนียมด้วยน้ำหนักกรัมต่อกรัม แต่อย่างไรก็ตามด้วยคุณสมบัติที่ดีแต่มีราคาแพงจึงได้มีการออกแบบให้ฮีทซิงค์นั้นใช้โลหะทั้ง2

ประเภทคือในส่วนที่เป็นแผ่นหรือส่วนที่จะสัมผัสกับอุปกรณ์นั้นจะทำด้วยทองแดง อาจจะทำทั้งแผ่นหรือเฉพาะเพียงส่วนที่แตะกับแกนกลางและส่วนที่เป็นครีบบนฮีทซิงค์นั้นก็ทำด้วยอลูมิเนียมแทน

คุณภาพของฮีทซิงค์จะมีคุณภาพดีมาน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับวิธีการออกแบบตัวฮีทซิงค์โดยจะต้องออกแบบให้มีคุณลักษณะสำคัญ 2 ประการคือ

1. ทำให้พื้นที่ผิวของตัวฮีทซิงค์มากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้
2. ให้อากาศนั้นไหลผ่านตัวฮีทซิงค์มากที่สุดด้วยทิศทางที่ดีที่สุดเท่าที่จะทำได้

นอกจากหลักการทั้ง 2 ข้อนี้ ตัวฮีทซิงค์เองจะต้องถูกออกแบบให้ความร้อนนั้นสามารถที่จะเดินทางมาจากด้านล่างซึ่งเป็นส่วนที่จะต้องสัมผัสกับอุปกรณ์ไปสู่ส่วนที่เรียกว่าครีบบนได้ง่าย และส่วนที่สัมผัสกับอุปกรณ์นั้นจะต้องราบเรียบที่สุด ซึ่งในความเป็นจริงแล้ว ถึงแม้ว่าหน้าสัมผัสนั้นจะดูราบเรียบอย่างไร หน้าสัมผัสนั้นก็ยังคงมีช่องว่างเล็กๆที่แทบจะมองไม่เห็นอยู่แต่สามารถแก้ไขได้โดยการใช้สารนำความร้อนที่มีลักษณะอ่อนตัวมาเป็นตัวประสานให้หน้าสัมผัสของฮีทซิงค์กับอุปกรณ์นั้นสนิทกันมากขึ้น

ดังนั้นจากปัจจัยที่มีผลต่อตัวฮีทซิงค์จึงทำให้การออกแบบจึงออกมาในแนวของการทำให้ฮีทซิงค์นั้นมีขนาดใหญ่ที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้พร้อมกับการใช้พัดลมที่มีพลังสูงๆนอกจากนี้ก็คือ การทำให้ฮีทซิงค์นั้นมีครีบบนเป็นจำนวนมาก พร้อมกับออกแบบให้อากาศที่เป่ามาจากพัดลมนั้น สามารถที่จะไหลผ่านฮีทซิงค์ได้อย่างสะดวก โดยที่การไหลเวียนของอากาศเองนั้นจะไม่มีผลต่อสภาพอากาศที่อยู่รอบๆ

## บทที่ 3

### อุปกรณ์และวิธีดำเนินงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้มีการศึกษาและออกแบบระบบเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของระบบผลิตกำลังไฟฟาร่วมเซลล์แสงอาทิตย์และเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล จากการศึกษาข้อมูลในทางทฤษฎีและงานวิจัยต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการนำเซลล์แสงอาทิตย์และเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลมาผลิตกระแสไฟฟ้า โดยงานวิจัยนี้จะใช้หลอดไฟ BEC Halogen Floodlight CQ 500D ขนาด 500W เป็นแหล่งกำเนิดแสง โดยทำการนำแผงเซลล์แสงอาทิตย์มาติดบนแผ่นทองแดง และนำด้านร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลมาติดด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์ และนำด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลมาติดบนฮีทซิงค์ เพื่อที่จะทำให้เซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพในการทำงานดีขึ้น อีกทั้งเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลยังถูกนำมาใช้เป็นอุปกรณ์ในการผลิตกระแสไฟฟ้าให้กับระบบ ซึ่งจะแสดงรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 3.1 การออกแบบอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

อุปกรณ์และวิธีดำเนินการทดลองดังต่อไปนี้

##### 3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

###### 3.1.1.1 เซลล์แสงอาทิตย์

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้เซลล์แสงอาทิตย์แบบพหุผลึก ขนาด  $15.5\text{ cm} \times 15.5\text{ cm}$  มีค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด คือ  $0.56\text{ V}$  มีค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร  $3.0\text{ A}$  ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 เซลล์แสงอาทิตย์แบบพหุผลึกขนาด  $15.5\text{ cm} \times 15.5\text{ cm}$

### 3.1.1.2 เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล รุ่นDT12-6ผลิตจากบริษัท Marlow industries, inc.<sup>®</sup>ซึ่งสามารถใช้งานที่อุณหภูมิตั้งแต่ 27°C-50 °C ดังรูปที่ 3.2



รูปที่3.2 เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล รุ่นDT12-6

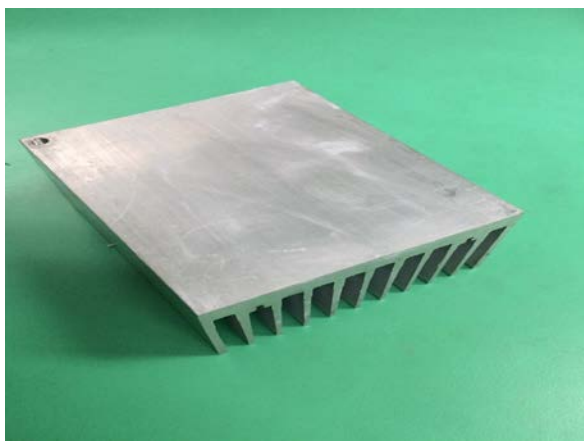
มีคุณสมบัติต่างๆแสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล รุ่นDT12-6

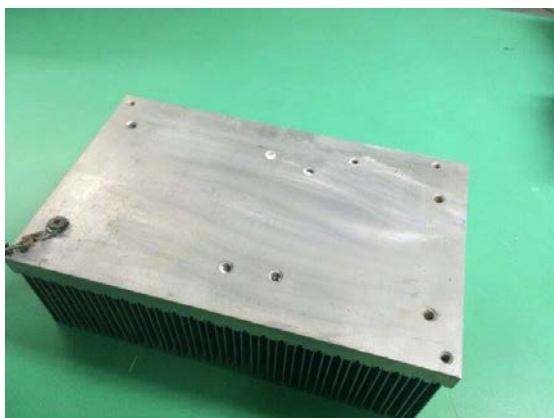
|                                                  |      |      |
|--------------------------------------------------|------|------|
| Hot Side Temperature (°C)                        | 27°C | 50°C |
| $\Delta T_{\text{Max}}$ (°C-dry N <sub>2</sub> ) | 66   | 74   |
| Q <sub>max</sub> (watts)                         | 54   | 60   |
| I <sub>max</sub> (amps)                          | 5.6  | 5.6  |
| V <sub>max</sub> (vdc)                           | 14.7 | 14.7 |
| AC Resistance (ohms)                             | 2.2  | -    |

### 3.1.1.3 ฮีทซิงค์

ฮีทซิงค์ จะใช้วิธีการพาความร้อนจากตัวอุปกรณ์สู่สิ่งแวดล้อมโดยเพิ่มพื้นที่สัมผัสอากาศทำให้การพาความร้อนจากตัวอุปกรณ์สู่อากาศโดยรอบทำได้เร็ว ในงานวิจัยนี้จะใช้ฮีทซิงค์ขนาด 9 cm. x 10 cm.จำนวน 11 ครีบ แต่ละครีบมีความยาว 4 cm จำนวน 1 อัน ดังรูปที่ 3.3และฮีทซิงค์ขนาด 12 cm. x 19.5 cm. จำนวน 48 ครีบ แต่ละครีบมีความยาว 5.3 cm ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.3ก ฮีทซิงค์ขนาด 9 cm. x10 cm. จำนวน 11 ครีบ แต่ละครีบมีความยาว 4 cm



รูปที่ 3.3ข ฮีทซิงค์ขนาด 12 cm. x 19.5 cm. จำนวน 48 ครีบ แต่ละครีบมีความยาว 5.3 cm

#### 3.1.1.4 แผ่นทองแดง

เนื่องจากทองแดงเป็นโลหะอ่อนจึงจัดเป็นรูปร่างต่างๆได้ง่าย มีคุณสมบัตินำไฟฟ้าและนำความร้อนได้ดี มีจุดหลอมเหลวและจุดเดือดค่อนข้างสูง ประโยชน์ส่วนใหญ่จึงใช้ในงานด้านไฟฟ้า เช่น ทำสายไฟฟ้า อุปกรณ์และเครื่องมือไฟฟ้าต่างๆ ในงานวิจัยนี้จะใช้แผ่นทองแดงขนาด 16.5 cm x 16.5 cm จำนวน 1 แผ่น ดังรูปที่ 3.4



รูปที่3.4 แผ่นทองแดง

#### 3.1.1.5 เทอร์โมคัปเปิลแบบทางปลากลม

เทอร์โมคัปเปิล คือ อุปกรณ์วัดอุณหภูมิโดยใช้หลักการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหรือความร้อนเป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้า ในงานวิจัยนี้จะใช้เทอร์โมคัปเปิล Type K มีความยาว 1 เมตร ชันสกรูลงในรูทางปลายยึดติดกับแผ่นทองแดง ดังรูปที่ 3.5



รูปที่3.5 เทอร์โมคัปเปิล Type K

#### 3.1.1.6 ตัวต้านทานปรับค่าได้ Rheostat ขนาด 33 $\Omega$

ตัวต้านทานปรับค่าได้ Rheostat ทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมกระแส มีสองขั้วใช้ต่ออนุกรมกับ Load ในงานวิจัยนี้ได้มีการใช้ตัวต้านทานปรับค่าได้ Rheostat ขนาด 33 $\Omega$  เพื่อปรับค่าความต้านทานให้กับวงจร เพื่อให้เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลสามารถสร้างแรงดันและผลิตกระแสไฟฟ้าได้ ดังรูปที่ 3.6



รูปที่3.6 ตัวต้านทานปรับค่าได้ Rheostat ขนาด 33  $\Omega$

### 3.1.1.7 หลอดไฟBEC Halogen Floodlight CQ 500D ขนาด 500 W และหลอดไฟ IP 65 E 40 ขนาด400 W

ในงานวิจัยนี้ได้มีการเลือกใช้หลอดไฟ 2 ชนิด คือ หลอดไฟ BEC Halogen Floodlight CQ 500Dขนาด500W และ หลอดไฟ IP 65 E 40 ขนาด 400 W เพื่อเปรียบเทียบค่าความเข้มแสงและค่าสเปกตรัมของแหล่งกำเนิดแสงกับค่าความเข้มแสงและค่าสเปกตรัมของแสงอาทิตย์เพื่อหาแหล่งกำเนิดแสงและค่าสเปกตรัมที่เหมาะสม การทดสอบนี้จะใช้สเปกโตรมิเตอร์ในการวัดค่าสเปกตรัมที่ความเข้มสูงสุดในช่วงต่างๆ จากการทดสอบพบว่าหลอดไฟ BEC Halogen Floodlight CQ 500D ขนาด 500 Wมีค่าสเปกตรัมใกล้เคียงกับค่าสเปกตรัมของแสงอาทิตย์มากที่สุด ผู้วิจัยจึงได้มีการเลือกใช้หลอดไฟ BEC Halogen Floodlight CQ 500D ขนาด 500 W เป็นแหล่งกำเนิดแสง ดังรูปที่ 3.7



รูปที่3.7 การเลือกใช้หลอดไฟเป็นแหล่งกำเนิดแสง(ก) หลอดไฟ BEC Halogen Floodlight CQ 500D ขนาด 500 W(ข) หลอดไฟ IP 65 E 40 ขนาด 400 W

### 3.1.1.8 สเปกโตรมิเตอร์

สเปกโตรมิเตอร์ เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดหาความเข้มของแสงในช่วงสเปกตรัมย่านต่างๆ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้มีการนำเครื่องสเปกโตรมิเตอร์มาใช้ในการหาค่าความเข้มแสงและค่าสเปกตรัมของแสงอาทิตย์ เพื่อหาแหล่งกำเนิดแสงและค่าสเปกตรัมที่เหมาะสมเพื่อใช้ในงานวิจัย ดังรูปที่ 3.8



รูปที่3.8 สเปกโตรมิเตอร์

#### 3.1.1.9 ไพรานอมิเตอร์ รุ่น LP02

ไพรานอมิเตอร์ทำหน้าที่เป็นเซนเซอร์วัดปริมาณแสงแดด ไพรานอมิเตอร์จะมีแผ่นรับแสงแดดเป็นวัสดุสีดำทำหน้าที่ดูดกลืนช่วงสเปกตรัมของแสงตั้งแต่ 305nm ถึง 2800nm ในงานวิจัยนี้จะใช้ไพรานอมิเตอร์ รุ่น LP02 เป็นเซนเซอร์วัดปริมาณแสงแดด ค่าที่ได้จะถูกบันทึกผ่านเครื่องอ่านและบันทึกค่า Read-out/Datalogger Unit รุ่น LT19 ดังรูปที่ 3.9



รูปที่3.9 ไพรานอมิเตอร์ รุ่น LP02

#### 3.1.1.10 พัดลมไฟฟ้าขนาด 12วัตต์

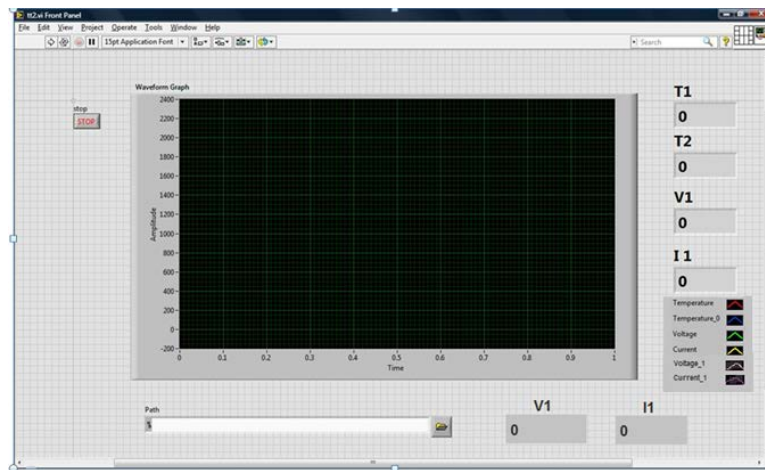
ใช้พัดลมระบายความร้อนให้กับระบบดังรูปที่ 3.10



รูปที่3.10 พัดลมไฟฟ้าขนาด 12 วัตต์

### 3.1.1.11ระบบจัดเก็บข้อมูลอัตโนมัติ

ในระหว่างกระบวนการศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตกำลังไฟฟ้าของระบบรวมเซลล์แสงอาทิตย์และเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล จะมีตัวแปรต่างๆที่ต้องศึกษามากมาย เช่น อุณหภูมิของแหล่งความร้อน ( $T_H$ ) , อุณหภูมิในการระบายความร้อน ( $T_C$ ) ,ค่ากระแสไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล ( $I_{TE}$ ) , ค่าความต่างศักย์ของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล ( $V_{TE}$ ) , ค่ากระแสไฟฟ้าขณะลัดวงจร( $I_{SC}$ ) และค่าความต่างศักย์ขณะวงจรเปิด ( $V_{OC}$ ) ตัวแปรต่างๆเหล่านี้ล้วนแล้วแต่ส่งผลถึงประสิทธิภาพในการผลิตกำลังไฟฟ้าทั้งสิ้น ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องมีการจัดเก็บข้อมูลที่ถูกต้องและแม่นยำเพื่อจะได้นำข้อมูลไปวิเคราะห์ให้ถูกต้อง ในอดีตจะใช้วิธีการจดบันทึกค่าจากการทดลองโดยใช้มือ ซึ่งวิธีนี้ถือว่าให้ความแม่นยำต่ำและส่งผลถึงการวิเคราะห์ข้อมูลที่ผิดพลาด ทำให้การทดลองมีความคลาดเคลื่อนเป็นอย่างมาก



รูปที่3.11 แสดงภาพสัญญาณที่ได้ในระหว่างการทำงาน

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงต้องออกแบบและสร้างระบบจัดเก็บข้อมูลแบบอัตโนมัติ ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 3.11 เริ่มต้นจากการนำสัญญาณในระหว่างการทำงานของระบบผลิตกำลังไฟฟ้าจากเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็นสองส่วน คือ สัญญาณอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ และสัญญาณไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์และเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล โดยจะถูกแปลงผ่านอุปกรณ์ที่เรียกว่าData Acquisition (DAQ) ซึ่งมีความเร็วในการเก็บข้อมูลในระดับมิลลิวินาที (ms) จะใช้ NI 9211 สำหรับวัดอุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ ) , NI 9201 สำหรับวัดแรงดันไฟฟ้า (V) และ NI 9227 สำหรับวัดกระแสไฟฟ้า(A) ดังรูปที่ 3.12 ความแม่นยำในการวัดข้อมูลเป็น  $\pm 0.05\%$  ,  $\pm 0.04\%$  และ $\pm 0.1\%$  ตามลำดับ ก่อนที่จะจัดเก็บในเครื่องคอมพิวเตอร์

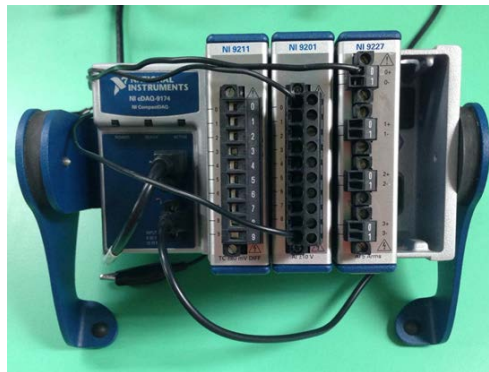
ในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้โปรแกรมมาตรฐานที่มีชื่อว่า Labviewในการจัดเก็บสัญญาณและแสดงผลแบบ Real Time ข้อมูลทั้งหมดจะถูกจัดเก็บและนำมาวิเคราะห์เพื่อการศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตกำลังไฟฟ้าของระบบรวมเซลล์แสงอาทิตย์และเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลต่อไป



(ก)

(ข)

(ค)



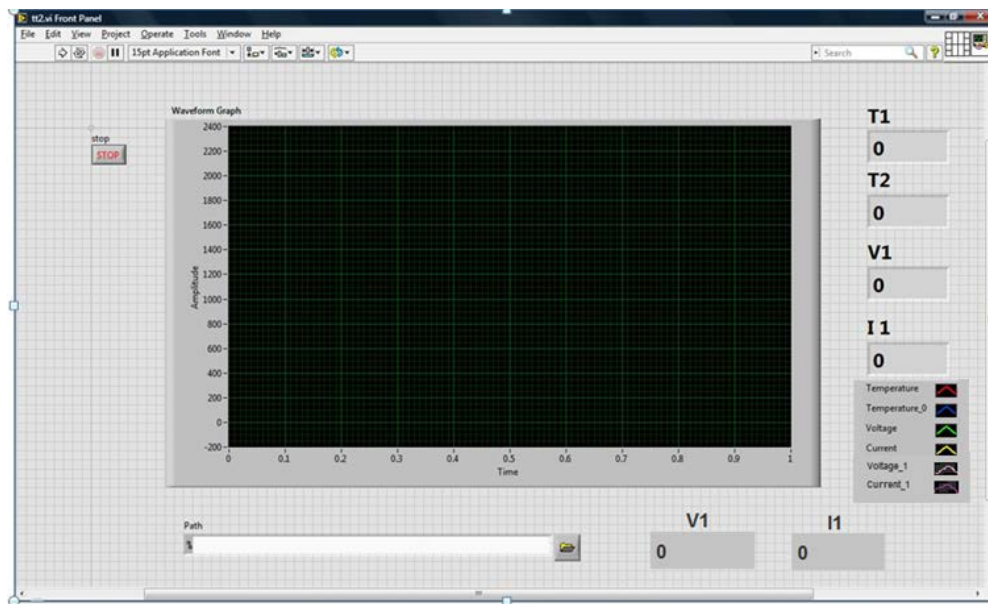
(ง) Data Acquisition (DAQ)

รูปที่ 3.12 ระบบจัดเก็บข้อมูลอัตโนมัติประกอบด้วย

(ก) NI9211 (ข) NI9201 (ค) NI9227 (ง) Data Acquisition (DAQ)

### 3.1.1.12 โปรแกรม Lab View

โปรแกรม LabVIEW เป็นโปรแกรมที่สร้างเพื่อนำมาใช้ในการวัดและเครื่องมือวัดสำหรับงานทางวิศวกรรม LabVIEW ย่อ มาจาก Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench ซึ่งหมายความว่า เป็นโปรแกรมที่สร้างเครื่องมือวัดเสมือนจริงในห้องปฏิบัติการทางวิศวกรรม ดังนั้นจุดประสงค์หลักของการทำงานของโปรแกรมนี้ คือการจัดการในด้านการวัดและเครื่องมือวัดอย่างมีประสิทธิภาพ และในตัวของโปรแกรมจะประกอบไปด้วยฟังก์ชันที่ใช้ช่วยในการวัดมากมาย ดังรูปที่ 3.13 และแน่นอนที่สุด โปรแกรมนี้จะมีประโยชน์อย่างสูงเมื่อใช้ร่วมกับเครื่องมือวัดทางวิศวกรรมต่างๆ สิ่งที่ LabVIEW แตกต่างจากโปรแกรมอื่นอย่างเห็นได้ชัดที่สุดก็คือ LabVIEW เป็นโปรแกรมประเภท GUI (Graphic User Interface) ไม่จำเป็นต้องเขียน code หรือคำสั่งใดๆ ทั้งสิ้นและที่สำคัญ ลักษณะภาษาที่ใช้ในโปรแกรมนี้เราจะเรียกว่า เป็นภาษารูปภาพหรือเรียกอีกอย่างง่ายว่า ภาษา G (Graphical Language) ซึ่งจะแทนการเขียนโปรแกรมเป็นบรรทัดได้อย่างที่เราคุ้นเคยกับภาษาพื้นบ้าน เช่น C, BASIC หรือ FORTRAN ด้วยรูปภาพหรือสัญลักษณ์ทั้งหมด

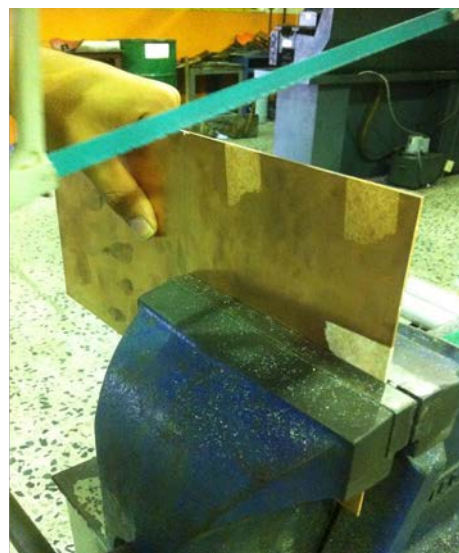
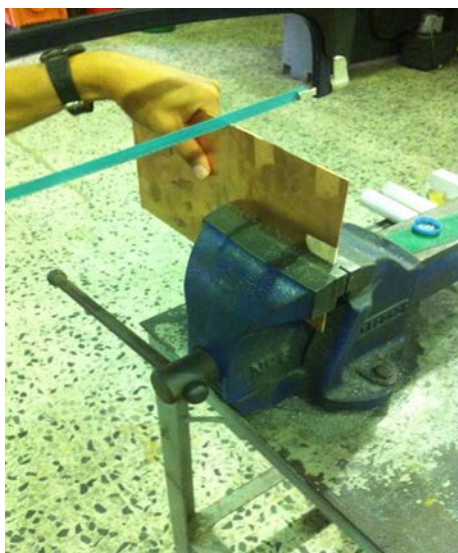


รูปที่3.13 โปรแกรม Lab View

### 3.1.2 ขั้นตอนการทดลอง

#### 3.1.2.1 การออกแบบชิ้นงาน

3.1.2.1.1 นำแผ่นทองแดงมาตัดด้วยเลื่อยตัดเหล็ก ให้มีขนาด 16.5 cm x 16.5 cm จำนวน 1 ชิ้น ดังรูปที่ 3.14



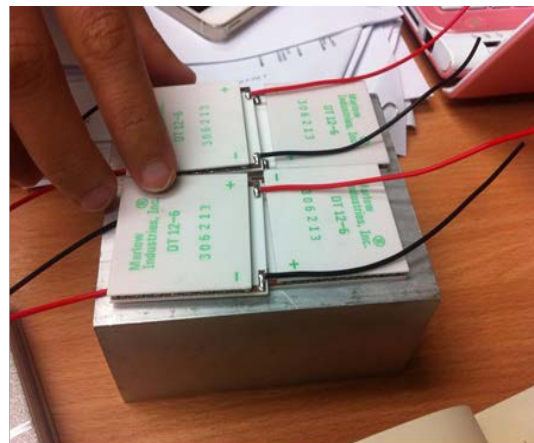
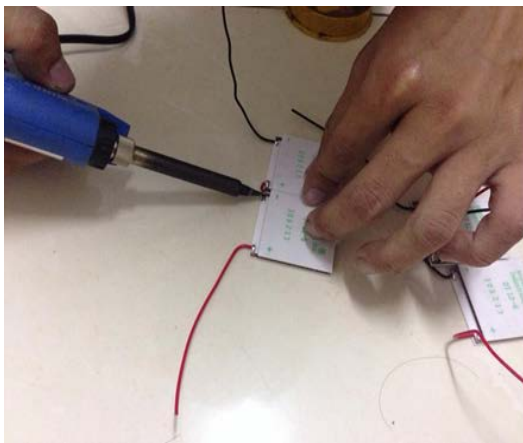
รูปที่3.14 การตัดแผ่นทองแดงด้วยเลื่อยตัดเหล็ก

3.1.2.1.2 เมื่อตัดแผ่นทองแดงเสร็จแล้วนำแผ่นทองแดงที่ได้มาเจาะรูด้วยเครื่องเจาะ จากนั้นนำเทอร์โมคัปเปิล Type K มาขันสกรูลงในรูทางปลาเพื่อยึดติดกับแผ่นทองแดง (เพื่อวัดอุณหภูมิทางด้านร้อน) ดังรูปที่ 3.15



รูปที่3.15 การเจาะรูแผ่นทองแดงด้วยเครื่องเจาะ

3.1.2.1.3 นำเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลจำนวน 4 ตัว มาต่อกันแบบอนุกรม นำไปติดบนฮีทซิงค์ โดยที่มุมใดมุมหนึ่งของฮีทซิงค์มีการเจาะรู จากนั้นนำเทอร์โมคัปเปิล Type K มาขันสกรูลงในรูทางปลาเพื่อยึดติดกับฮีทซิงค์ (เพื่อวัดอุณหภูมิทางด้านเย็น) ดังรูปที่ 3.16



รูปที่3.16 การติดตั้งเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลบนฮีทซิงค์

3.1.2.1.4 นำแผ่นทองแดงติดลงบนฮีทซิงค์ที่มีเทอร์โมอิเล็กทริกติดอยู่ ด้วยกาวซิลิโคน ดังรูปที่ 3.17



รูปที่3.17 การนำแผ่นทองแดงมาติดตั้งลงบนฮีทซิงค์ที่มีเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลติดอยู่

3.1.2.1.5 นำแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบพหุผลึกจำนวน 1 เซลล์ ติดลงบนแผ่นทองแดง ดังรูปที่ 3.18



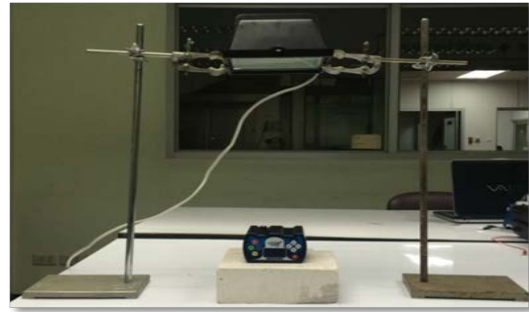
รูปที่3.18 การนำแผงเซลล์แสงอาทิตย์มาติดตั้งลงบนแผ่นทองแดงที่มีเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลติดอยู่กับฮีทซิงค์

### 3.1.2.2 การเลือกใช้หลอดไฟเป็นแหล่งกำเนิดแสง

จุดประสงค์ของการเลือกใช้หลอดไฟ คือ เพื่อเปรียบเทียบค่าความเข้มแสงและค่าสเปกตรัมของหลอดไฟ IP 65 E 40 ขนาด 400 W และ หลอดไฟ BEC Halogen Floodlight CQ 500D ขนาด 500 W กับค่าความเข้มแสงและค่าสเปกตรัมของแสงอาทิตย์เพื่อหาแหล่งกำเนิดแสงและค่าสเปกตรัมที่เหมาะสม การทดสอบนี้จะใช้สเปกโตรมิเตอร์ในการวัดค่าสเปกตรัมที่ความเข้มสูงสุดในช่วงต่างๆ มีการจัดอุปกรณ์ดังรูปที่ 3.19



(ก)

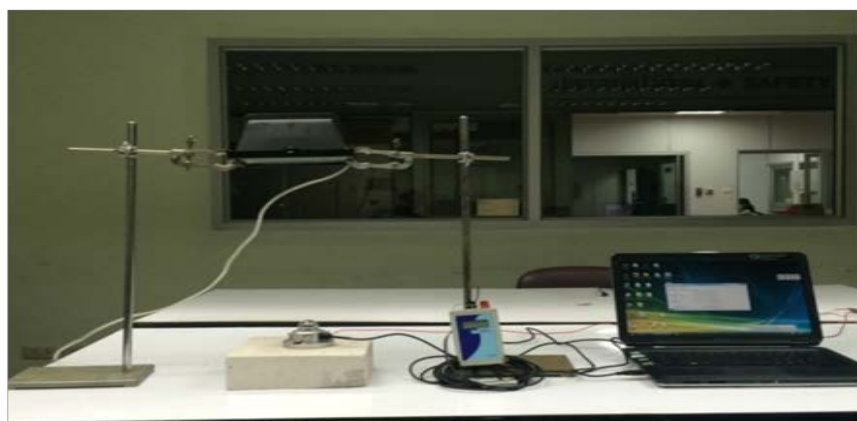


(ข)

รูปที่ 3.19 อุปกรณ์การทดลองการหาค่าความเข้มแสงและค่าสเปกตรัม (ก) หลอดไฟ IP 65 E 40 ขนาด 400W (ข) หลอดไฟ BEC Halogen Floodlight CQ 500D ขนาด 500W

### 3.1.2.3 การกำหนดระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดแสงกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์

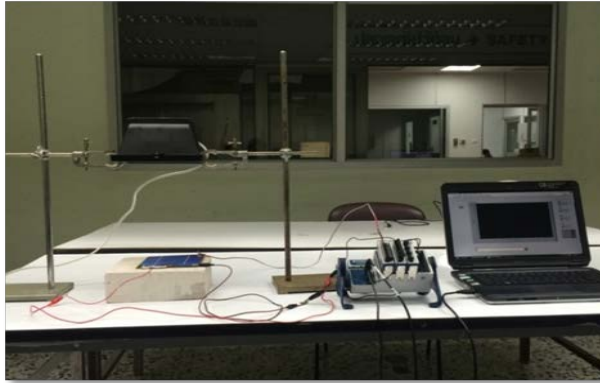
เมื่อผู้วิจัยได้หลอดไฟตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการแล้ว ในหัวข้อนี้จะศึกษาว่าระยะห่างที่เหมาะสมที่จะทำให้หลอดไฟ BEC Halogen Floodlight CQ 500D ขนาด 500 W มีค่าความเข้มแสงใกล้เคียงหรือเท่ากับค่าความเข้มแสงมาตรฐาน A.M 1.5 ซึ่งเป็นค่าความเข้มแสงที่วัดบนพื้นผิวโลกซึ่งมีค่าเท่ากับ  $1000 \text{ W/m}^2$  โดยใช้ไพรานอมิเตอร์ ไพรานอมิเตอร์ เป็นเซนเซอร์วัดปริมาณแสงแดด ค่าที่ได้จะถูกบันทึกผ่านเครื่องอ่านและบันทึกค่า Read-out/Datalogger Unit รุ่น LT19 โดยมีการจัดอุปกรณ์ดังรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 อุปกรณ์การทดลองการกำหนดระยะห่างของหลอดไฟ BEC Halogen Floodlight CQ500D ขนาด 500 W กับ แผงเซลล์แสงอาทิตย์

#### 3.1.2.4 การทดสอบค่าความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดของเซลล์แสงอาทิตย์

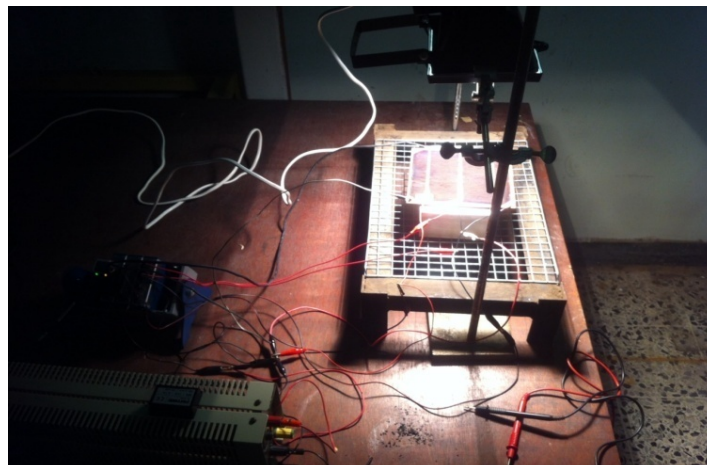
ผู้วิจัยได้ทำการทดลองนำแผงเซลล์แสงอาทิตย์มาต่อเข้ากับ NI โดยใช้ NI เป็นระบบจัดเก็บข้อมูลอัตโนมัติประกอบด้วย NI 9201 NI 9211 และ NI 9227ค่าที่ได้จากการทดสอบในครั้งนี้จะถูกบันทึกข้อมูลลงในโปรแกรม Labview เพื่อหาความสัมพันธ์ว่าอุณหภูมิมีผลทำให้แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดเป็นอย่างไร



รูปที่3.21 อุปกรณ์การทดลองในการบันทึกค่า  $V_{oc}(V)$  และ  $T (^{\circ}C)$ จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ กับหลอดไฟ BEC Halogen Floodlight CQ 500Dขนาด 500 W

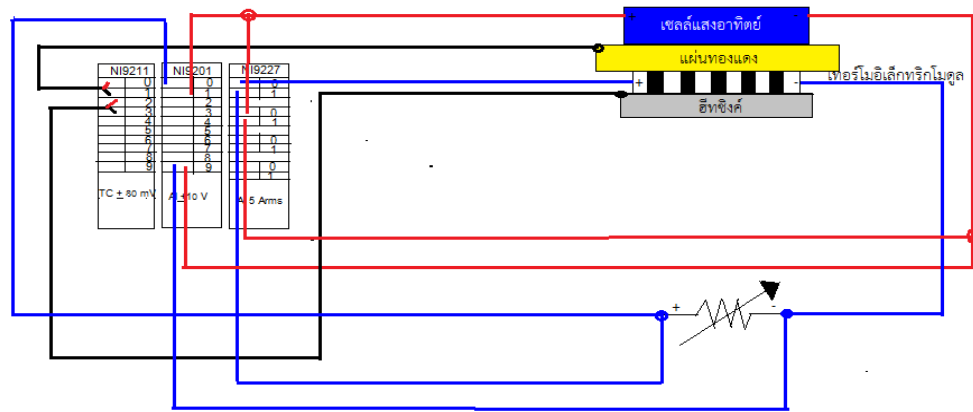
#### 3.1.2.5 การทดสอบประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล

ในงานวิจัยนี้จะใช้เทอร์โมอิเล็กทริก 4ตัว โดยเทอร์โมอิเล็กทริกแต่ละตัวมีค่า AC Resistance 2.2 รวมเป็น 8.8  $\Omega$  อุปกรณ์ทั้งหมดมีการเชื่อมต่อกันแบบอนุกรม เพื่อให้ได้ค่าความต่างศักย์สูงที่สุด ทางด้านบนของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลจะใช้แผ่นทองแดงในการสะสมความร้อน ในการทดสอบจะใช้ความต้านทานปรับค่าได้ Rheostat เป็นการปรับค่าความต้านทานให้กับวงจร เพื่อให้เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้มากที่สุด



รูปที่3.22 อุปกรณ์การทดลองในการทดสอบประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล กับหลอดไฟ BEC Halogen Floodlight CQ 500Dขนาด 500 W

3.1.2.6 การทดสอบกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการศึกษาความเป็นไปได้ของระบบผลิตกำลังไฟฟาร่วมเซลล์แสงอาทิตย์และเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลแบบไม่มีพัดลมระบายความร้อนโดยเริ่มจากการรวมระบบของระบบผลิตกำลังไฟฟาร่วมเซลล์แสงอาทิตย์และเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล ซึ่งในการทดสอบครั้งนี้จะมีการต่อวงจรดังรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.23 แสดงการต่อวงจรที่ใช้ในการทดสอบหา กำลังไฟฟ้าของระบบร่วมเซลล์แสงอาทิตย์และเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล

3.1.2.6.1 ใช้ หลอดไฟ BEC Halogen Floodlight CQ 500D ขนาด 500 W เป็น แหล่งกำเนิดแสง

3.1.2.6.2 เปิดแหล่งกำเนิดแสงทิ้งไว้ 10 นาที

3.1.2.6.3 ทำการฉายแสงจากแหล่งกำเนิดแสงลงบนระบบร่วมเซลล์แสงอาทิตย์และเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลแบบไม่มีพัดลมระบายความร้อน

3.1.2.6.4 บันทึกค่าอุณหภูมิด้านร้อนและด้านเย็นของระบบร่วมเซลล์แสงอาทิตย์และเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลแบบไม่มีพัดลมระบายความร้อนโดยใช้ NI 9201 พร้อมทั้งบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์และเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลสร้างได้ โดยใช้ NI9211 และ NI 9227 ตามลำดับ จับเวลา 30 นาที

3.1.2.7 การทดสอบกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการศึกษาความเป็นไปได้ของระบบผลิตกำลังไฟฟาร่วมเซลล์แสงอาทิตย์และเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลแบบมีพัดลมระบายความร้อน

3.1.2.7.1 ใช้ หลอดไฟ BEC Halogen Floodlight CQ 500D ขนาด 500 W เป็น แหล่งกำเนิดแสง

3.1.2.7.2 เปิดแหล่งกำเนิดทิ้งไว้ 10 นาที

3.1.2.7.3 ทำการฉายแสงจากแหล่งกำเนิดแสงลงบนระบบร่วมเซลล์แสงอาทิตย์และเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลแบบมีพัดลมระบายความร้อน

3.1.2.7.4 บันทึกค่าอุณหภูมิด้านร้อนและด้านเย็นของระบบร่วมเซลล์แสงอาทิตย์และเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลแบบมีพัดลมระบายความร้อนโดยใช้ NI 9201 พร้อมทั้งบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าและ

กระแสไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์และเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลสร้างได้ โดยใช้ NI9211 และ NI 9227 ตามลำดับ จับเวลา 30 นาที

3.1.2.7.5 ทำการเปลี่ยนขนาดของฮีทซิงค์ โดยใช้ฮีทซิงค์ขนาด 12x19.5x6.5 cm. จำนวน 48 ครีบ แต่ละครีบมีความยาว 5.3 cm. เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานของระบบรวมแบบไม่มีพัดลมระบายความร้อน

3.1.2.7.5 บันทึกค่าอุณหภูมิด้านร้อนและด้านเย็นของระบบรวมเซลล์แสงอาทิตย์และเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลแบบมีพัดลมระบายความร้อนโดยใช้ NI 9201 พร้อมทั้งบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์และเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลสร้างได้ โดยใช้ NI9211 และ NI 9227 ตามลำดับ จับเวลา 30 นาที

3.1.2.8 เปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลและเซลล์แสงอาทิตย์ และค่ากำลังไฟฟ้าของระบบรวมทั้งแบบมีพัดลมระบายความร้อนและไม่มีพัดลมระบายความร้อนก่อนเปลี่ยนขนาดของฮีทซิงค์ และไม่มีมีพัดลมระบายความร้อนเมื่อทำการเปลี่ยนขนาดของฮีทซิงค์แล้ว

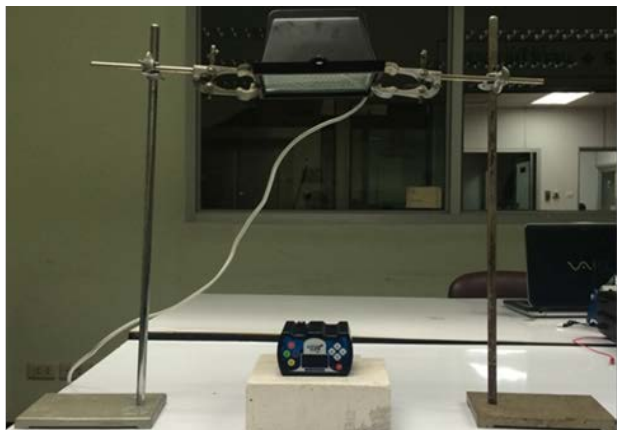
## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการอภิปราย

ในบทนี้จะอธิบายถึงการออกแบบระบบและผลการทดลองเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของระบบผลิตกำลังไฟฟ้าวร่วมเซลล์แสงอาทิตย์และเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล โดยแบ่งออกเป็น 5 หัวข้อ ได้แก่ การเลือกใช้หลอดไฟเป็นแหล่งกำเนิดแสง การกำหนดระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดแสงกับเซลล์แสงอาทิตย์ การทดสอบค่าความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดของเซลล์แสงอาทิตย์ การทดสอบประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล และการศึกษาความเป็นไปได้ของระบบผลิตกำลังไฟฟ้าวร่วมเซลล์แสงอาทิตย์และเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลแบบมีพัฒนาระบายความร้อน และแบบไม่มีพัฒนาระบายความร้อน โดยแต่ละหัวข้อจะมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 4.1 การเลือกใช้หลอดไฟเพื่อเป็นแหล่งกำเนิดแสง

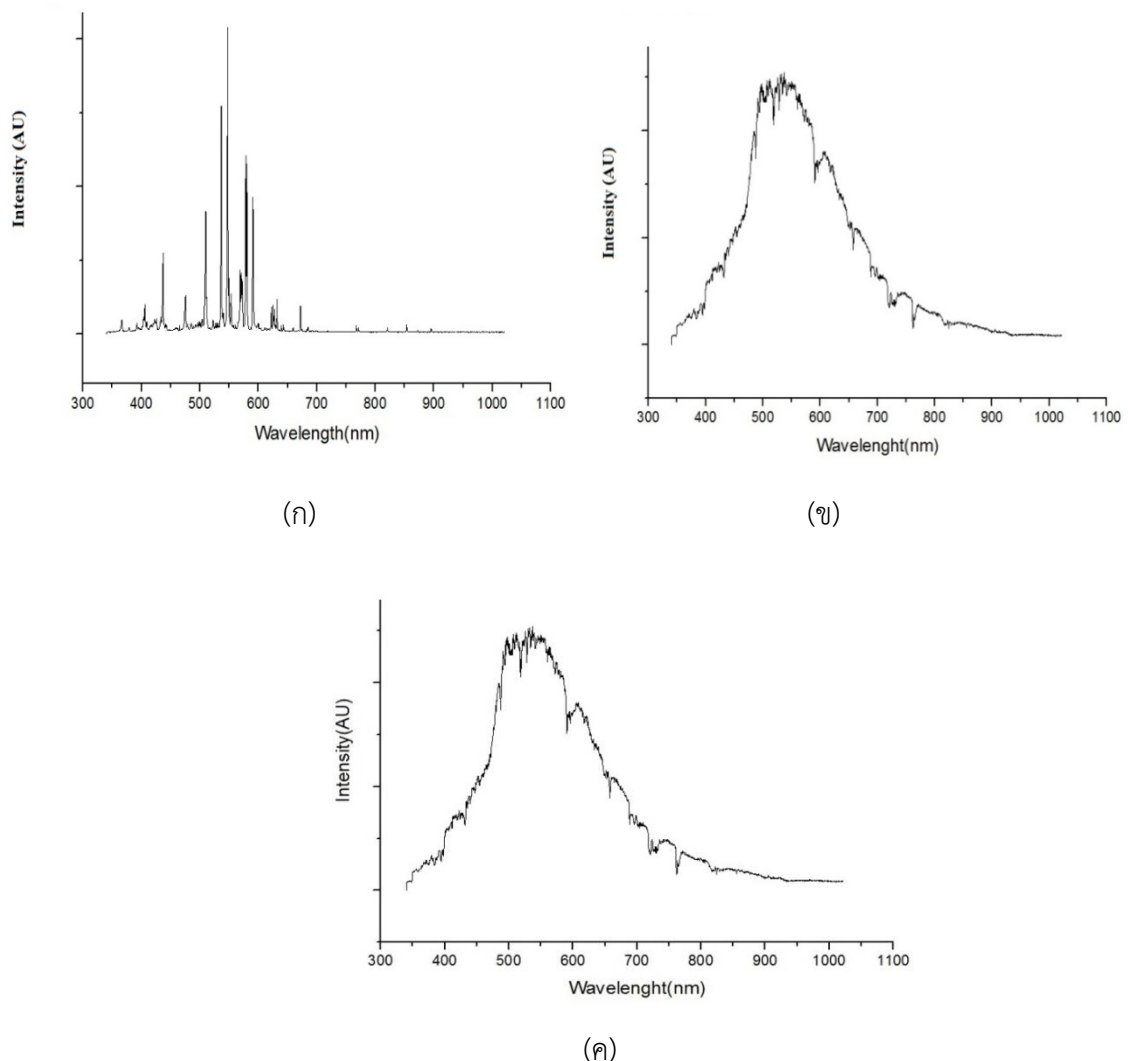
ในเบื้องต้นผู้วิจัยได้ทำการเลือกใช้หลอดไฟ โดยจุดประสงค์ของการเลือกใช้หลอดไฟ คือ เพื่อเปรียบเทียบค่าความเข้มแสงและค่าสเปกตรัมของหลอดไฟ IP 65E 40 ขนาด 400 W และ หลอดไฟ BEC Halogen Floodlight CQ 500D ขนาด 500 W กับค่าความเข้มแสงและค่าสเปกตรัมของแสงอาทิตย์เพื่อทำการหาแหล่งกำเนิดแสงและค่าสเปกตรัมที่เหมาะสมโดยใช้สเปกโตรมิเตอร์ในการวัดค่าสเปกตรัมที่ความเข้มสูงสุดในช่วงต่างๆ โดยจัดอุปกรณ์ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 อุปกรณ์การทดลองการหาค่าความเข้มแสงและสเปกตรัมของแหล่งกำเนิดแสง (ก) หลอดไฟ IP 65 E 40 ขนาด 400 W (ข) หลอดไฟ BEC Halogen Floodlight CQ 500D ขนาด 500 W

จากนั้นนำสเปกโตรมิเตอร์มาวัดค่าสเปกตรัมของหลอดไฟ IP 65 E 40 ขนาด 400 W และหลอดไฟ BEC Halogen Floodlight CQ 500D ขนาด 500 W โดยกำหนดระยะห่างระหว่างสเปกโตรมิเตอร์

กับหลอดไฟ IP 65 E 40 ขนาด 400 W และหลอดไฟ BEC Halogen Floodlight CQ 500D ขนาด 500 W เท่ากับ 24.5 cm. และ 48.5 cm. ตามลำดับ ทำการวัดค่าสเปกตรัมของแหล่งกำเนิดแสงทั้งสองชนิดเพื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าสเปกตรัมของแสงอาทิตย์ เพื่อเป็นการหาแหล่งกำเนิดแสงที่มีสเปกตรัมใกล้เคียงกับสเปกตรัมของแสงอาทิตย์ ดังที่ได้แสดงผลดังรูป 4.2



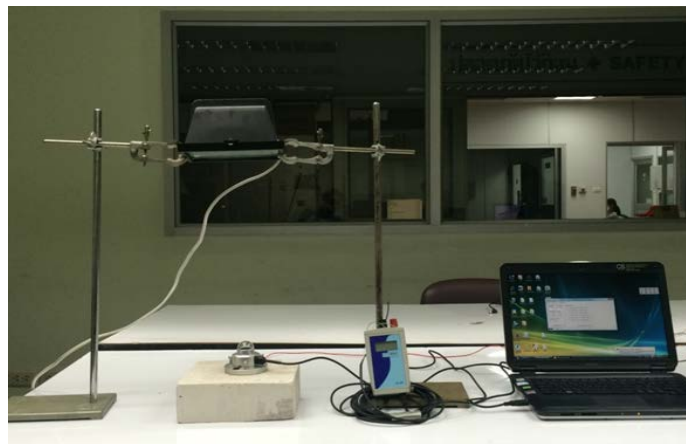
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มแสงกับค่าสเปกตรัม  
(ก) หลอดไฟ IP 65 E 40 ขนาด 400 W (ข) หลอดไฟ BEC Halogen Floodlight cq500D ขนาด 500 W (ค) แสงอาทิตย์

เมื่อทำการทดลองพบว่าหลอดไฟ IP 65 E 40 ขนาด 400W มีค่าสเปกตรัมที่ความเข้มแสงสูงสุดประมาณ 550 nm หลอดไฟ BEC Halogen Floodlight CQ 500D ขนาด 500 W มีค่าสเปกตรัมที่ความเข้มแสงสูงสุดประมาณ 600 nm เมื่อนำค่าสเปกตรัมของหลอดไฟทั้ง 2 ชนิดมาเปรียบเทียบกับค่าสเปกตรัมของแสงอาทิตย์พบว่าค่าสเปกตรัมของหลอดไฟ BEC Halogen Floodlight CQ 500D ขนาด 500 W มีค่าสเปกตรัมใกล้เคียงกับค่าสเปกตรัมของแสงอาทิตย์

มากกว่าหลอดไฟ IP 65 E 40 ขนาด 400W ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้เลือกใช้หลอดไฟ BEC Halogen Floodlight CQ 500D ขนาด 500 W เป็นแหล่งกำเนิดแสงเพื่อใช้ในการทำวิจัยต่อไป

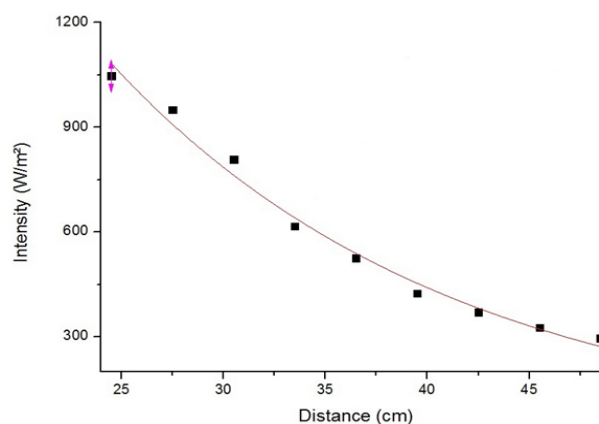
#### 4.2 การกำหนดระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดแสงกับเซลล์แสงอาทิตย์

เมื่อผู้วิจัยได้แหล่งกำเนิดแสงตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการ จากนั้นผู้วิจัยจึงทำการหาระยะห่างที่เหมาะสมที่จะทำให้แหล่งกำเนิดแสงมีค่าความเข้มแสงใกล้เคียงหรือเท่ากับค่าความเข้มแสงที่ A.M 1.5 ซึ่งเป็นค่าความเข้มแสงมาตรฐานที่วัดบนพื้นผิวโลกซึ่งมีค่าเท่ากับ  $1000 \text{ W/m}^2$  โดยใช้ไพรานอมิเตอร์ในการวัดค่าความเข้มแสงโดยมีการจัดอุปกรณ์ดังรูปที่ 4.3 ในการทดลองนี้ ผู้วิจัยได้ทำการทดลองโดยการให้แหล่งกำเนิดแสงอยู่ห่างจากไพรานอมิเตอร์ที่ระยะห่างต่างๆ เพื่อทำการหาระยะห่างที่ทำให้แหล่งกำเนิดแสงมีค่าความเข้มแสงใกล้เคียงหรือเท่ากับค่าความเข้มแสงที่ A.M 1.5



รูปที่ 4.3 อุปกรณ์การทดลองในการกำหนดระยะห่างของหลอดไฟ BEC Halogen Floodlight CQ 500D ขนาด 500 W กับเซลล์แสงอาทิตย์

ผลการทดลองในการกำหนดระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดแสงกับเซลล์แสงอาทิตย์จะเป็นดังรูปที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าเมื่อระยะห่างของแหล่งกำเนิดแสงห่างจากไพรานอมิเตอร์มากขึ้น ค่าความเข้มแสงจะมีค่าลดลง

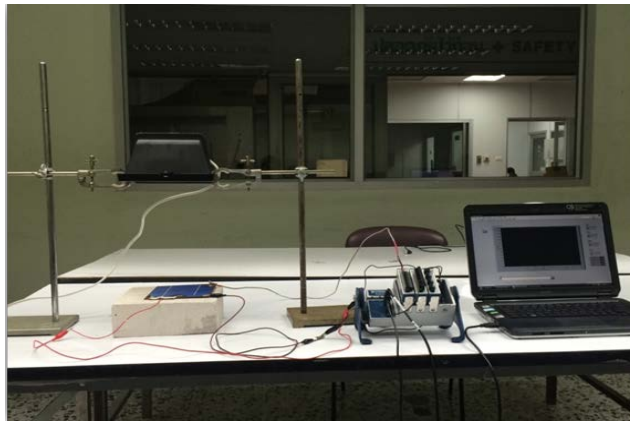


รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างของแหล่งกำเนิดแสงที่ห่างจากไพรานอมิเตอร์กับค่าความเข้มแสงของหลอดไฟ BEC Halogen Floodlight CQ 500D ขนาด 500W

จากรูปที่ 4.4 จะพบว่าระยะห่างที่เหมาะสมและมีค่าความเข้มแสงใกล้เคียงหรือเท่ากับค่าความเข้มแสงมาตรฐาน A.M 1.5 ซึ่งเป็นค่าความเข้มแสงที่วัดบนพื้นผิวโลกซึ่งมีค่าเท่ากับ  $1000 \text{ W/m}^2$  คือระยะห่างที่ 24.5 cm. มีค่าความเข้มแสงอยู่ที่  $1,047 \text{ W/m}^2$  ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกใช้ระยะห่างที่ 24.5 เซนติเมตร ในการทดลองต่อไป

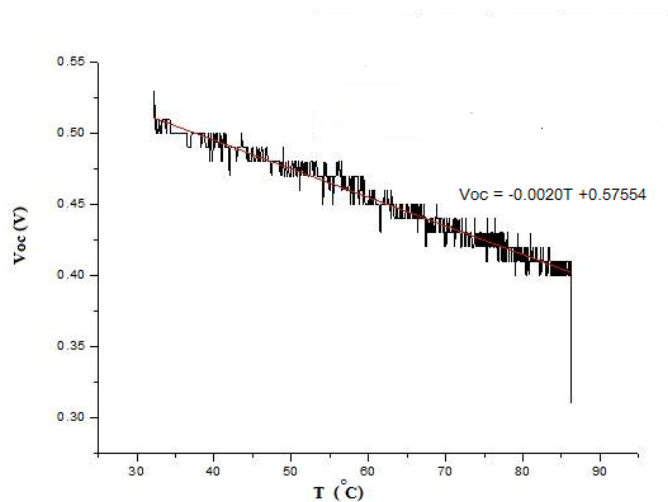
#### 4.3 การทดสอบค่าความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดของเซลล์แสงอาทิตย์

ผู้วิจัยได้ทำการทดลองนำเซลล์แสงอาทิตย์มาต่อเข้ากับระบบจัดเก็บข้อมูลอัตโนมัติ ประกอบด้วย NI 9201 และ NI 9211 ทำหน้าที่ในการวัดแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดและอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ตามลำดับค่าที่ได้จากการทดสอบในครั้งนี้ถูกบันทึกข้อมูลลงในโปรแกรม Labview เพื่อหาความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดของเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 4.5 อุปกรณ์การทดลองในการบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด (V) และอุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ ) ของเซลล์แสงอาทิตย์

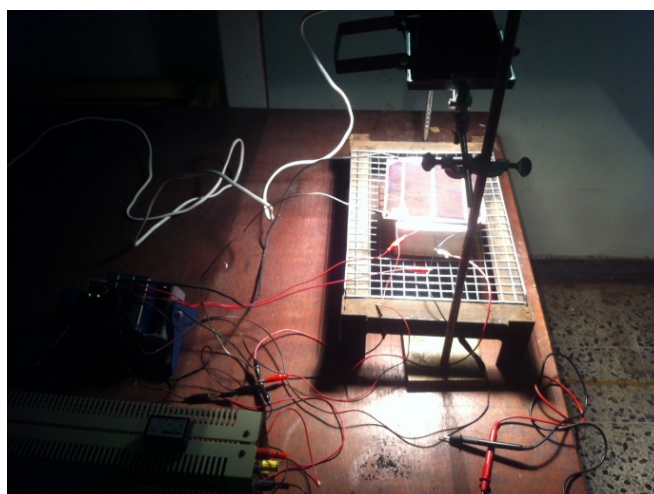
ผู้วิจัยได้ทำการจัดอุปกรณ์ดังรูปที่ 4.5 โดยกำหนดให้หลอดไฟ BEC Halogen Floodlight CQ 500D ขนาด 500 W วางห่างจากเซลล์แสงอาทิตย์ 24.5 cm. วัดค่า  $V_{oc}$  (V) และอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ ( $^{\circ}\text{C}$ ) โดยใช้เทอร์โมคัปเปิล Type K จากรูปที่ 4.6 พบว่าค่าของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้เซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดลดลง 16% เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิห้องถึง  $80^{\circ}\text{C}$  โดยการลดลงของแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นมีลักษณะเป็นเชิงเส้นและความสัมพันธ์ดังสมการ  $V_{oc} = -0.0020T + 0.57554$  ในรูปที่ 4.6 ผลที่ได้จากการทดลองมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ W.G.J.H.M. van Sark ที่กล่าวว่าเมื่อความเข้มรังสีของดวงอาทิตย์และอุณหภูมิเพิ่มขึ้น จะทำให้เซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพลดลง 20%



รูปที่4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด(V)กับอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์( °C)

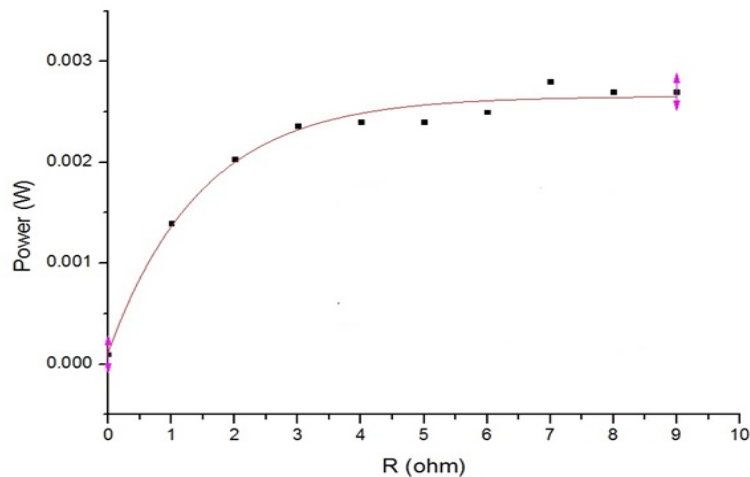
#### 4.4 การทดสอบประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล

ในงานวิจัยนี้ใช้เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล 4 ตัว โดยเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลแต่ละตัวมีค่าความต้านทาน  $2.2\Omega$  เพื่อให้ได้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลแต่ละตัวเชื่อมต่อกันแบบอนุกรมทางด้านบนของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลจะใช้แผ่นทองแดงในการสะสมความร้อนในการทดสอบครั้งนี้ใช้ความต้านทานปรับค่าได้ Rheostat เป็นตัวปรับค่าความต้านทานให้กับวงจร เพื่อให้เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้มากที่สุด ผู้วิจัยได้ทำการต่ออุปกรณ์ดังรูปที่ 4.7 โดยผู้วิจัยได้ทำการบันทึกค่าโดยใช้แอมมิเตอร์ในการบันทึกค่ากระแสไฟฟ้าและใช้โวลต์มิเตอร์ในการบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้า โดยผู้วิจัยได้ทำการเปิดแหล่งกำเนิดแสงทิ้งไว้ 10 นาที เพื่อให้แหล่งกำเนิดแสงมีความเข้มแสงคงที่ หลังจากนั้นทำการเพิ่มค่าความต้านทานทีละ 1 ค่าเพื่อทำการบันทึกค่ากระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าเพื่อนำไปทำการหาลำดับกำลังไฟฟ้า



รูปที่4.7 อุปกรณ์การทดลองในการทดสอบประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล

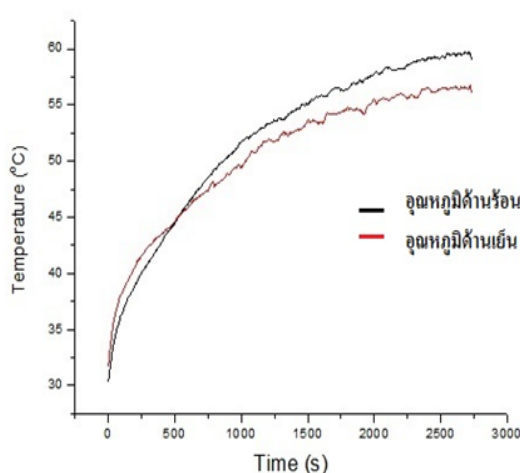
จากนั้นนำค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้มาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานแต่ละค่ากับค่ากำลังไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลได้ดังรูปที่ 4.8 จากรูปที่ 4.8 พบว่าที่ค่าความต้านทานเท่ากับ  $7\Omega$  เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้มากที่สุดซึ่งมีค่ากำลังไฟฟ้าสูงถึง  $2.8 \times 10^{-3} \text{ W}$  สำหรับวัตถุประสงค์ของการทดสอบประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลนั้น ผู้วิจัยเลือกใช้ค่าความต้านทานเท่ากับ  $7\Omega$  เพื่อให้เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด



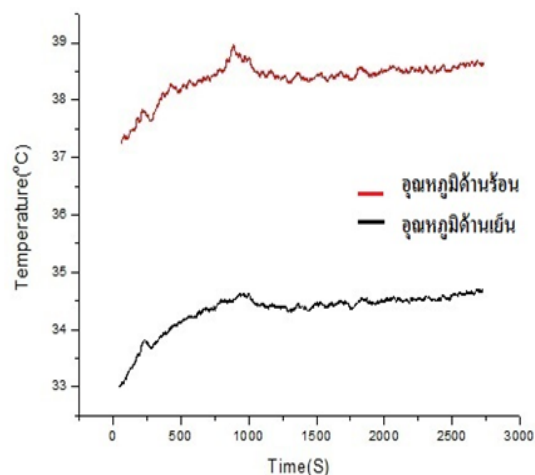
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ค่าความต้านทาน ( $\Omega$ ) กับ กำลังไฟฟ้า (W)

#### 4.5 การศึกษาความเป็นไปได้ของระบบผลิตกำลังไฟฟ้าวรรวมเซลล์แสงอาทิตย์และเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลแบบมีพัลลระบายความร้อนและแบบไม่มีพัลลระบายความร้อน

ผู้วิจัยได้ทำการเลือกใช้หลอดไฟ BEC Halogen Floodlight CQ 500D ขนาด 500 W เป็นแหล่งกำเนิดแสงเปิดแหล่งกำเนิดแสงทิ้งไว้ 10 นาทีเพื่อให้แหล่งกำเนิดแสงมีความเข้มแสงคงที่ หลังจากนั้นทำการฉายแสงจากแหล่งกำเนิดแสงลงบนระบบที่ประกอบด้วยเซลล์แสงอาทิตย์และเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลทั้งแบบมีพัลลระบายความร้อนและแบบไม่มีพัลลระบายความร้อน ทำการบันทึกค่าอุณหภูมิด้านร้อนและด้านเย็นของระบบโดยใช้ NI 9201 พร้อมทั้งบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์และเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลที่สร้างได้ โดยใช้ NI9211 และ NI 9227 ตามลำดับ จับเวลา 30 นาทีจากนั้นนำค่าอุณหภูมิและเวลามาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอุณหภูมิของระบบทั้งแบบมีพัลลระบายความร้อนและแบบไม่มีพัลลระบายความร้อนจากรูปที่ 4.9 พบว่าระบบแบบไม่มีพัลลระบายความร้อนการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิทั้งด้านร้อนและด้านเย็นมีค่าเพิ่มขึ้น แต่แบบมีพัลลระบายความร้อนการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิก่อนข้างคงที่



(ก)



(ข)

รูปที่4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลา (s) กับอุณหภูมิ (°C)

(ก) แบบไม่มีพดลมระบายความร้อน (ข) แบบมีพดลมระบายความร้อน

จากนั้นนำค่า  $\Delta T$  จากกราฟข้างต้นมาทำการเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\Delta T$  กับค่ากำลังไฟเพื่อทำการเปรียบเทียบการผลิตกำลังไฟฟ้าของทั้งสองแบบพบว่าระบบแบบมีพดลมระบายความร้อนกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์และเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลมีค่ามากกว่าแบบไม่มีพดลมระบายความร้อน เนื่องจากพดลมที่นำมาใช้ในการระบายความร้อนให้กับระบบสามารถทำให้อุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ลดลงไม่มากนักจึงทำให้สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้ดีขึ้น ดังรูปที่ 4.10 และสามารถดูค่าการทดลองได้จากตารางที่ 4.1 และตารางที่ 4.2 ที่ได้จากการบันทึกการเก็บข้อมูลทุกๆ 1 นาที ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองมีความสอดคล้องกับทฤษฎีของ M.M.M.Daud ที่กล่าวว่าเมื่อความเข้มรังสีเพิ่มมากขึ้น ประสิทธิภาพที่ได้จากระบบผลิตไฟฟ้าร่วมเซลล์แสงอาทิตย์กับเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลแบบไม่มีระบบระบายความร้อนมีค่า 7.551% เมื่อนำระบบระบายความร้อนใส่เข้าไปจะทำให้ประสิทธิภาพของระบบรวมเพิ่มขึ้นเป็น 8.82% เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ

ตารางที่4.1 แสดงผลต่างของอุณหภูมิ(°C ),กำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์และเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล (W) ที่ได้มีการบันทึกเก็บข้อมูลทุกๆ 1 นาที ของระบบแบบไม่มีพดลมระบายความร้อน

| ผลต่างระหว่าง<br>อุณหภูมิ<br>(องศาเซลเซียส) | กำลังไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริก-<br>โมดูล(วัตต์) | กำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์<br>(วัตต์) |
|---------------------------------------------|-------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| 1.430                                       | 0.0006653                                       | 0.489174                                |
| 1.510                                       | 0.0010672                                       | 0.477546                                |
| 1.593                                       | 0.0020278                                       | 0.466260                                |

|       |           |          |
|-------|-----------|----------|
| 1.690 | 0.0027492 | 0.467457 |
| 1.812 | 0.0042853 | 0.454746 |
| 1.922 | 0.0059682 | 0.440435 |
| 2.001 | 0.0082455 | 0.436719 |
| 2.105 | 0.0090210 | 0.412680 |
| 2.233 | 0.0120226 | 0.395000 |
| 2.389 | 0.0120226 | 0.374530 |
| 2.438 | 0.0123519 | 0.364790 |
| 2.502 | 0.0116647 | 0.345720 |
| 2.598 | 0.0122042 | 0.327010 |
| 2.705 | 0.0121097 | 0.309240 |
| 2.828 | 0.0123224 | 0.287500 |
| 2.891 | 0.0113721 | 0.263890 |
| 2.906 | 0.0116932 | 0.264587 |
| 3.106 | 0.0110888 | 0.266402 |
| 3.246 | 0.0120860 | 0.266302 |

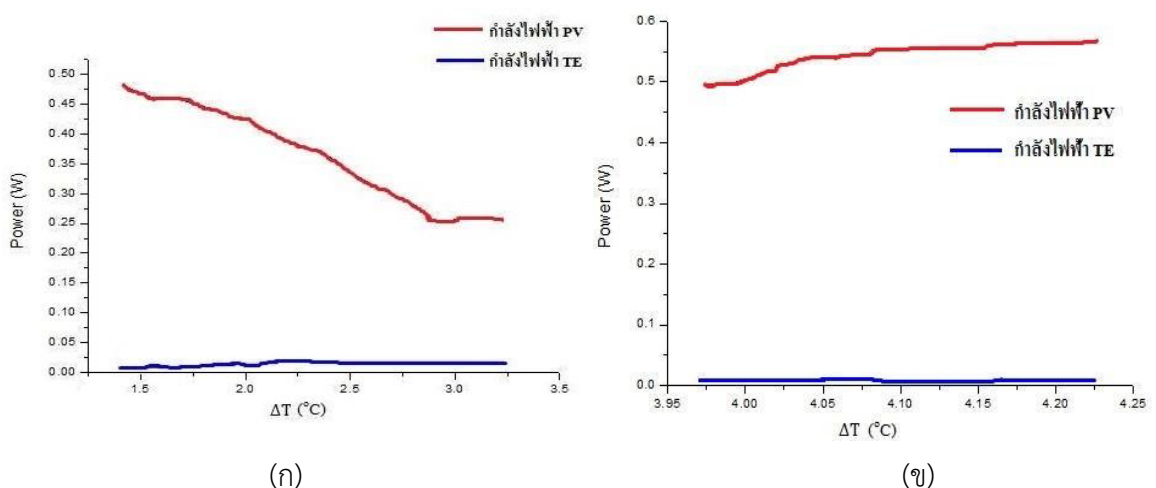
จากตารางที่4.1 พบว่าเมื่อผลต่างของอุณหภูมิเพิ่มมากขึ้น แนวโน้มของการผลิตกำลังไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริกมีค่าเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงมาก แต่เซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้น้อยลงเนื่องจากการสะสมความร้อน

ตารางที่4.2 แสดงผลต่างของอุณหภูมิ( °C ),กำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์และเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล (W) ที่ได้มีการบันทึกเก็บข้อมูลทุกๆ 1นาทิจของระบบแบบมีพัดลมระบายความร้อน

| ผลต่างระหว่าง<br>อุณหภูมิ<br>(องศาเซลเซียส) | กำลังไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริก<br>โมดูล(วัตต์) | กำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์<br>(วัตต์) |
|---------------------------------------------|------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| 3.942                                       | 0.0085                                         | 0.48777                                 |
| 3.959                                       | 0.0086                                         | 0.46787                                 |
| 3.968                                       | 0.0093                                         | 0.46893                                 |
| 3.974                                       | 0.0086                                         | 0.47850                                 |
| 3.975                                       | 0.0092                                         | 0.46832                                 |
| 3.985                                       | 0.0084                                         | 0.48302                                 |
| 3.989                                       | 0.0089                                         | 0.48423                                 |

|       |        |         |
|-------|--------|---------|
| 3.971 | 0.0087 | 0.44336 |
| 3.994 | 0.0088 | 0.45323 |
| 4.019 | 0.0089 | 0.45250 |
| 4.020 | 0.0086 | 0.46342 |
| 4.037 | 0.0087 | 0.45895 |
| 4.046 | 0.0086 | 0.47137 |
| 4.058 | 0.0093 | 0.47347 |
| 4.079 | 0.0095 | 0.48268 |
| 4.082 | 0.0091 | 0.48867 |
| 4.160 | 0.0087 | 0.48433 |
| 4.164 | 0.0109 | 0.49764 |
| 4.225 | 0.0109 | 0.51158 |

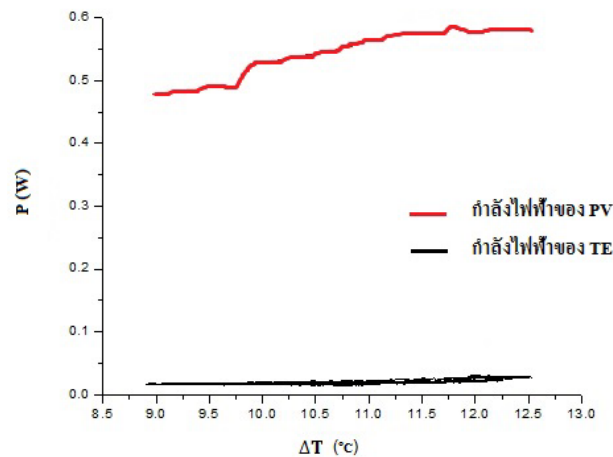
จากตารางที่4.2 พบว่าแบบมีพัลลภระบายความร้อน เมื่อผลต่างของอุณหภูมิเพิ่มมากขึ้น แนวโน้มของการผลิตกำลังไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลค่อนข้างคงที่เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิคงที่จึงทำให้เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้น้อย แต่เซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้เพิ่มขึ้น เนื่องจากการได้มีการระบายความร้อนให้แก่ระบบ



รูปที่4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\Delta T$ กับค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้ (W) (ก) กำลังไฟฟ้าที่ได้จากระบบรวมแบบไม่มีพัลลภระบายความร้อน (ข) กำลังไฟฟ้าที่ได้จากระบบรวมแบบมีพัลลภระบายความร้อน

แต่เนื่องจากพัลลภที่ใช้ในการระบายความร้อนมีความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงกว่าที่ระบบสามารถผลิตได้ อาจทำให้เกิดความไม่คุ้มค่าแก่การผลิต ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกที่จะใช้ระบบแบบไม่มีพัลลภระบายความร้อนและทำการเปลี่ยนขนาดฮีตซิงค์เพื่อใช้ในการระบายความร้อนให้กับระบบแทน

จากนั้นผู้วิจัยได้ทำการเปลี่ยนขนาดของฮีทซิงค์ โดยเปลี่ยนมาใช้ฮีทซิงค์ขนาด 12x19.5x6.5 cm. จำนวน 48 ครีบ แต่ละครีบมีความยาว 5.3 cm. เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานของระบบรวมแบบไม่มีพัดลมระบายความร้อนโดยทำการบันทึกค่าอุณหภูมิด้านร้อนและด้านเย็นของระบบรวมเซลล์แสงอาทิตย์และเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลโดยใช้ NI 9201 พร้อมทั้งบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์และเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลสร้างได้ โดยใช้ NI9211 และ NI 9227 ตามลำดับ จับเวลา 30 นาทีจากนั้นนำค่า  $\Delta T$  ที่ได้จากกราฟข้างต้น มาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\Delta T$  กับค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้จากระบบดังรูปที่ 4.11



รูปที่4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\Delta T$  ( °C)กับค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้ (W) เมื่อเปลี่ยนขนาดของฮีทซิงค์

จากนั้นผู้วิจัยได้ทำการหาค่ากำลังไฟฟ้าต่อพื้นที่เพื่อนำมาวิเคราะห์หาค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์และเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลของการทดลองในขั้นตอนต่างๆเพื่อนำมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพและสรุปผลการทดลอง

การคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าต่อหน่วยพื้นที่ของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลและเซลล์แสงอาทิตย์

$$\text{กำลังไฟฟ้าต่อพื้นที่} = \frac{IV}{A} \quad (6)$$

เมื่อ I คือ ค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุด หน่วย แอมแปร์(A)

Vคือ ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุด หน่วย โวลต์ (V)

A คือ พื้นที่ของเทอร์โมอิเล็กทริกและเซลล์แสงอาทิตย์ หน่วย ตารางเมตร (m<sup>2</sup>)

การคำนวณหาประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลและเซลล์แสงอาทิตย์

$$\eta = \frac{\text{กำลังไฟฟ้าต่อพื้นที่}}{\text{ค่าความเข้มแสงของแหล่งกำเนิดแสง}} \times 100 \% \quad (7)$$

เมื่อทำการคำนวณหาประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลและเซลล์แสงอาทิตย์ของแบบต่างๆ เสร็จเรียบร้อยแล้วจะทำการนำผลที่ได้ทำการคำนวณมาทำการเปรียบเทียบเพื่อให้ระบบผลิต กำลังไฟฟ้าร่วมเซลล์แสงอาทิตย์และเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลมีประสิทธิภาพสูงสุด ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่4.3 แสดงการเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลและเซลล์แสงอาทิตย์ และค่ากำลังไฟฟ้าของระบบรวมแบบมีพัฒนาระบายความร้อน,ไม่มีพัฒนาระบายความร้อน (ฮีทซิงค์ A) และไม่มีมีพัฒนาระบายความร้อนเมื่อเปลี่ยนขนาดของฮีทซิงค์ (ฮีทซิงค์ B)

|                                      | ฮีทซิงค์A                |                                  | ฮีทซิงค์B                            |
|--------------------------------------|--------------------------|----------------------------------|--------------------------------------|
|                                      | มีพัฒนาระบาย<br>ความร้อน | ไม่มีพัฒนาระบาย<br>ระบายความร้อน | ไม่มีพัฒนาระบาย<br>ระบาย<br>ความร้อน |
| กำลังไฟฟ้ารวม (วัตต์)                | 0.45                     | 0.36                             | 0.54                                 |
| ประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล | 0.16%                    | 0.24%                            | 0.24%                                |
| ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์        | 0.18%                    | 0.13%                            | 1.89%                                |

จากตารางข้างต้นจะเห็นได้ว่าเมื่อนำพัฒนาระบายความร้อนมาใช้กับระบบจะพบว่าระบบสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงกว่าระบบแบบไม่มีพัฒนาระบายความร้อน 0.09 วัตต์ แต่เนื่องจากเมื่อใช้พัฒนาระบายความร้อนให้กับระบบนั้นพัฒนาระบายความร้อนจะใช้กำลังไฟฟ้าค่อนข้างมากและส่งผลให้ไม่คุ้มค่าแก่การผลิตกำลังไฟฟ้า ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกที่จะศึกษาระบบรวมแบบไม่มีพัฒนาระบายความร้อนและได้ทำการเปลี่ยนขนาดของฮีทซิงค์เพื่อให้ระบบรวมสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้มากขึ้น เมื่อทำการทดลองแล้วพบว่าระบบรวมสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงขึ้นถึง0.1838 วัตต์และมากกว่าแบบมีพัฒนาระบายความร้อน 0.09 วัตต์ อีกทั้งเมื่อทำการเปลี่ยนฮีทซิงค์แล้วค่าประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลมีค่าใกล้เคียงกับระบบแบบไม่มีพัฒนาระบายความร้อน ซึ่งเป็นค่าประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลที่ดีที่สุด และประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าใกล้เคียงกับระบบแบบมีพัฒนาระบายความร้อน ซึ่งเป็นค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ดีที่สุดเช่นเดียวกัน

## บทที่ 5

# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาความเป็นไปได้ของระบบผลิตกำลังไฟฟ้าวร่วมเซลล์แสงอาทิตย์และเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล ผลการทดลองพบว่า หลอดไฟ BEC Halogen Floodlight CQ 500D ขนาด 500 W มีค่าสเปกตรัม 600 นาโนเมตร ใกล้เคียงกับค่าสเปกตรัมของแสงอาทิตย์และมีค่าความเข้มแสงเท่ากับ  $1,047 \text{ W/m}^2$  ใกล้เคียงกับความเข้มแสงมาตรฐานที่ A.M 1.5 ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $1,000 \text{ W/m}^2$  ที่มีระยะห่างที่ 24.5 เซนติเมตร และจากการศึกษาความเป็นไปได้ของระบบผลิตกำลังไฟฟ้าของระบบรวมแบบไม่มีพัลลภระบายความร้อนและมีพัลลภระบายความร้อน ผลการศึกษพบว่าระบบแบบไม่มีพัลลภระบายความร้อนสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้ 0.36 วัตต์ และระบบแบบมีพัลลภระบายความร้อนสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้ 0.45 วัตต์ แต่เนื่องจากใช้พัลลภระบายความร้อนให้กับระบบรวมนั้น พัลลภระบายความร้อนจะใช้กำลังไฟฟ้าค่อนข้างมากและส่งผลให้ไม่คุ้มค่าแก่การผลิตไฟฟ้าและระบบผลิตกำลังไฟฟ้าวร่วมก็ยังมีประสิทธิภาพที่ค่อนข้างต่ำจึงทำให้มีประสิทธิภาพในการผลิตกำลังไฟฟ้าได้ไม่ค่อยดีเท่าที่ควร ผู้วิจัยจึงได้มีการเปลี่ยนขนาดของฮีทซิงค์เพื่อให้ระบบผลิตกำลังไฟฟ้าวร่วมสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด ผลที่ได้คือ ระบบรวมแบบไม่มีพัลลภระบายความร้อนเมื่อเปลี่ยนขนาดของฮีทซิงค์แล้วสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้มากถึง 0.54 วัตต์ ดังนั้นผู้วิจัยจึงสรุปได้ว่าระบบผลิตกำลังไฟฟ้าวร่วมเซลล์แสงอาทิตย์และเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลนั้นมีความเป็นไปได้แต่ต้องมีการระบายความร้อนที่ดีให้กับระบบ

### 5.2 ข้อเสนอแนะ

หากระบบได้นำไปติดตั้งในพื้นที่มีลมเช่นชายทะเลก็อาจทำให้ระบบมีประสิทธิภาพดีขึ้นเนื่องจากมีการระบายความร้อน

## เอกสารอ้างอิง

M.M.M. Daud, Nursyarizal Bin Mohd Nor. 2013. “Novel Hybrid Photovoltaic and Thermoelectric Panel” Taib Ibrahim Electrical and Electronics Engineering Universiti Teknologi PETRONAS Perak, Malaysia.

W.G.J.H.M. van Sark Dept. Science, 2012. “Feasibility of Photovoltaic –Thermoelectric hybrid modules” Technology and Society, Copernicus Institute, Utrecht University, Budapestlaan 6, 3584 CD Utrecht, The Netherlands.

W.G.J.H.M. van Sark Dept. Science, 2013. “Introduction to Thermoelectrics & Design Manual”. Technology and Society, Copernicus Institute, Utrecht University, Budapestlaan 6, 3584 CD Utrecht, The Netherlands.

คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ. 2007

“ระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์” มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

คณะทำงานพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์ ภายใต้คณะกรรมการประสานงานวิจัยและพัฒนาพลังงาน

ทดแทน, 2540-2544. “นโยบายแผนและแนวทางวิจัยพัฒนาพลังงานทดแทน พลังงานเซลล์แสงอาทิตย์” สำนักคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม

จรัญ บุญยธรรมมา, “เทอร์โมอิเล็กทริก” คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล

ภาคผนวก ก

ตารางแสดงค่า แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าที่ได้จากเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล

| R (โอห์ม) | แรงดันไฟฟ้า (V ) | กระแสไฟฟ้า ( I ) | กำลังไฟฟ้าที่ได้(W)<br>P=IV |
|-----------|------------------|------------------|-----------------------------|
| 0         | 0.003            | 0.033            | $9.9 \times 10^{-5}$        |
| 1         | 0.059            | 0.025            | $1.4 \times 10^{-3}$        |
| 2         | 0.097            | 0.021            | $2.03 \times 10^{-3}$       |
| 3         | 0.188            | 0.020            | $2.36 \times 10^{-3}$       |
| 4         | 0.120            | 0.020            | $2.4 \times 10^{-3}$        |
| 5         | 0.130            | 0.019            | $2.4 \times 10^{-3}$        |
| 6         | 0.139            | 0.018            | $2.5 \times 10^{-3}$        |
| 7         | 0.156            | 0.018            | $2.8 \times 10^{-3}$        |
| 8         | 0.164            | 0.017            | $2.7 \times 10^{-3}$        |
| 9         | 0.174            | 0.016            | $2.7 \times 10^{-3}$        |
| 10        | 0.191            | 0.017            | -                           |

ตารางแสดงค่าผลต่างของอุณหภูมิ( $^{\circ}\text{C}$ ), กำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์และเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล (W) ที่ได้มีการบันทึกเก็บข้อมูลทุกๆ 1 นาที ของระบบแบบไม่มีพัดลมระบายความร้อน

| อุณหภูมิด้าน<br>ร้อน<br>(องศาเซลเซียส) | อุณหภูมิด้านเย็น<br>(องศาเซลเซียส) | ผลต่างระหว่าง<br>อุณหภูมิ<br>(องศาเซลเซียส) | กำลังไฟฟ้าของ<br>เทอร์โมอิเล็กทริก<br>โมดูล<br>(วัตต์) | กำลังไฟฟ้าของ<br>เซลล์แสงอาทิตย์<br>(วัตต์) |
|----------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------------|--------------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| 30.335                                 | 31.765                             | 1.430                                       | 0.0006653                                              | 0.489174                                    |
| 40.476                                 | 41.986                             | 1.510                                       | 0.0010672                                              | 0.477546                                    |
| 49.645                                 | 48.052                             | 1.593                                       | 0.0020278                                              | 0.466260                                    |
| 51.072                                 | 49.382                             | 1.690                                       | 0.0027492                                              | 0.467457                                    |
| 52.078                                 | 50.266                             | 1.812                                       | 0.0042853                                              | 0.454746                                    |
| 54.742                                 | 52.820                             | 1.922                                       | 0.0059682                                              | 0.440435                                    |
| 56.335                                 | 54.334                             | 2.001                                       | 0.0082455                                              | 0.436719                                    |
| 56.763                                 | 54.658                             | 2.105                                       | 0.0090210                                              | 0.412680                                    |
| 56.890                                 | 54.657                             | 2.233                                       | 0.0120226                                              | 0.395000                                    |
| 57.018                                 | 54.629                             | 2.389                                       | 0.0120226                                              | 0.374530                                    |
| 57.045                                 | 54.607                             | 2.438                                       | 0.0123519                                              | 0.364790                                    |
| 57.634                                 | 55.132                             | 2.502                                       | 0.0116647                                              | 0.345720                                    |
| 57.897                                 | 55.299                             | 2.598                                       | 0.0122042                                              | 0.327010                                    |
| 58.257                                 | 55.552                             | 2.705                                       | 0.0121097                                              | 0.309240                                    |
| 58.435                                 | 55.607                             | 2.828                                       | 0.0123224                                              | 0.287500                                    |
| 58.517                                 | 55.626                             | 2.891                                       | 0.0113721                                              | 0.263890                                    |
| 59.156                                 | 56.250                             | 2.906                                       | 0.0116932                                              | 0.264587                                    |
| 59.492                                 | 56.386                             | 3.106                                       | 0.0110888                                              | 0.266402                                    |
| 59.626                                 | 56.380                             | 3.246                                       | 0.0120860                                              | 0.266302                                    |

ตารางแสดงค่าผลต่างของอุณหภูมิ( °C ),กำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์และเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล (W ) ที่ได้มีการบันทึกเก็บข้อมูลทุกๆ 1นาทิจนของระบบแบบมีพัดลมระบายความร้อน

| อุณหภูมิด้าน<br>ร้อน(องศา<br>เซลเซียส) | อุณหภูมิด้านเย็น<br>(องศาเซลเซียส) | ผลต่างระหว่าง<br>อุณหภูมิ<br>(องศาเซลเซียส) | กำลังไฟฟ้าของ<br>เทอร์โมอิเล็กทริก<br>โมดูล<br>(วัตต์) | กำลังไฟฟ้าของ<br>เซลล์แสงอาทิตย์<br>(วัตต์) |
|----------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------------|--------------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| 37.686                                 | 33.742                             | 3.942                                       | 0.0085                                                 | 0.48777                                     |
| 37.75                                  | 33.796                             | 3.959                                       | 0.0086                                                 | 0.46787                                     |
| 37.735                                 | 33.766                             | 3.968                                       | 0.0093                                                 | 0.46893                                     |
| 37.787                                 | 33.813                             | 3.974                                       | 0.0086                                                 | 0.47850                                     |
| 37.764                                 | 33.788                             | 3.975                                       | 0.0092                                                 | 0.46832                                     |
| 37.686                                 | 33.701                             | 3.985                                       | 0.0084                                                 | 0.48302                                     |
| 37.660                                 | 33.671                             | 3.989                                       | 0.0089                                                 | 0.48423                                     |
| 37.670                                 | 33.699                             | 3.971                                       | 0.0087                                                 | 0.44336                                     |
| 37.819                                 | 33.825                             | 3.994                                       | 0.0088                                                 | 0.45323                                     |
| 38.376                                 | 34.356                             | 4.019                                       | 0.0089                                                 | 0.45250                                     |
| 38.502                                 | 34.482                             | 4.020                                       | 0.0086                                                 | 0.46342                                     |
| 38.525                                 | 34.487                             | 4.037                                       | 0.0087                                                 | 0.45895                                     |
| 38.454                                 | 34.408                             | 4.046                                       | 0.0086                                                 | 0.47137                                     |
| 38.456                                 | 34.398                             | 4.058                                       | 0.0093                                                 | 0.47347                                     |
| 38.506                                 | 34.427                             | 4.079                                       | 0.0095                                                 | 0.48268                                     |
| 38.548                                 | 34.466                             | 4.082                                       | 0.0091                                                 | 0.48867                                     |
| 38.564                                 | 34.404                             | 4.160                                       | 0.0087                                                 | 0.48433                                     |
| 38.747                                 | 34.583                             | 4.164                                       | 0.0109                                                 | 0.49764                                     |
| 38.709                                 | 34.484                             | 4.225                                       | 0.0109                                                 | 0.51158                                     |

ตารางแสดง ค่าระหว่างแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดกับอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์

| อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) | แรงดันไฟฟ้า |
|-------------------------|-------------|
| 32.13                   | 0.53        |
| 32.55                   | 0.51        |
| 33.67                   | 0.51        |
| 35.74                   | 0.50        |
| 38.08                   | 0.50        |
| 41.38                   | 0.49        |
| 43.46                   | 0.49        |
| 46.25                   | 0.49        |
| 50.90                   | 0.48        |
| 52.75                   | 0.48        |
| 54.45                   | 0.48        |
| 55.11                   | 0.47        |
| 59.60                   | 0.47        |
| 62.08                   | 0.46        |
| 64.46                   | 0.46        |
| 66.87                   | 0.45        |
| 68.84                   | 0.45        |
| 71.52                   | 0.44        |
| 73.78                   | 0.44        |
| 75.59                   | 0.43        |
| 76.80                   | 0.43        |
| 77.41                   | 0.43        |
| 79.74                   | 0.42        |
| 80.36                   | 0.42        |
| 82.24                   | 0.42        |
| 84.44                   | 0.41        |
| 85.03                   | 0.41        |
| 85.88                   | 0.40        |
| 86.21                   | 0.31        |

ตารางแสดงค่าระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดแสงกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์

| ความเข้มแสง( $\text{W/m}^2$ ) | ระยะห่าง (เซนติเมตร) |
|-------------------------------|----------------------|
| 1,047                         | 24.5                 |
| 950.33                        | 27.5                 |
| 808                           | 30.5                 |
| 616.37                        | 33.5                 |
| 525.33                        | 36.5                 |
| 424.67                        | 39.5                 |
| 370.67                        | 42.5                 |
| 326.67                        | 45.5                 |
| 296.67                        | 48.5                 |

ภาคผนวก ข