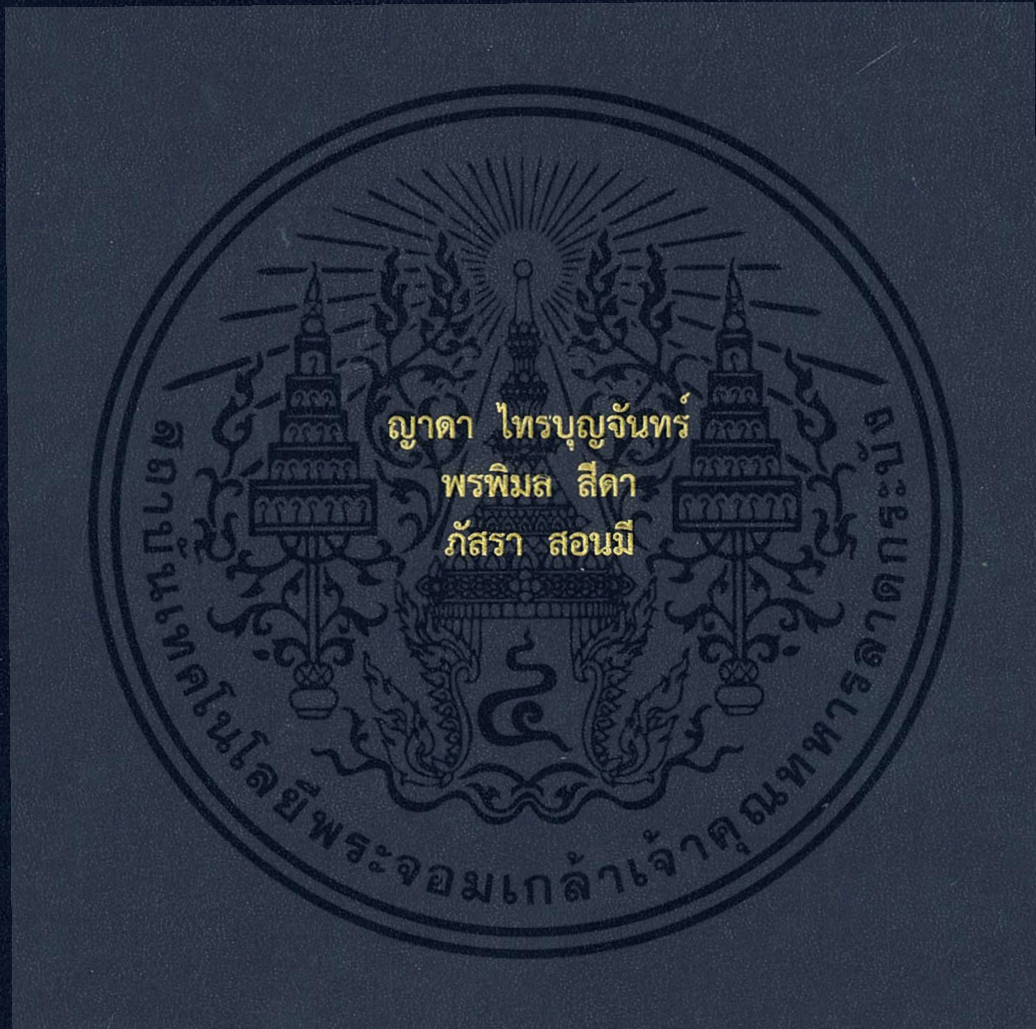


การศึกษาระบบรางรวมแสงพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาลอกลา  
A STUDY OF SOLAR PARABOLIC TROUGH COLLECTOR  
SYSTEM



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)  
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2558

การศึกษาระบบรางรวมแสงพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบล่าโบล่า  
A STUDY OF SOLAR PARABOLIC TROUGH COLLECTOR  
SYSTEM



b.00265909  
i.....

TB00194

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม  
หลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)  
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2558

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# A STUDY OF SOLAR PARABOLIC TROUGH COLLECTOR SYSTEM



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF  
THE REQUIREMENT FOR  
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (APPLIED PHYSICS)  
DEPARTMENT OF PHYSICS, FACULTY OF SCIENCE  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC YEAR 2015

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ

การศึกษาระบบรางรวมแสงพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบล่า  
A Study of Solar Parabolic Trough Collector System

ชื่อนักศึกษา

นางสาวญาดา ไทรบุญจันทร์ รหัสนักศึกษา 55051486  
นางสาวพรพิมล สีดา รหัสนักศึกษา 55051560  
นางสาวภัสรา สอนมี รหัสนักศึกษา 55051580

ปริญญา

วิทยาศาสตร์บัณฑิต(ฟิสิกส์ประยุกต์)

ภาควิชา

ฟิสิกส์





ปีการศึกษา

2558

อาจารย์ที่ปรึกษา

ดร.กัจปัญญา สุวรรณสุโข

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้  
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต(ฟิสิกส์ประยุกต์)  
ประจำปีการศึกษา 2558

| คณะกรรมการสอบ                              | ลายมือชื่อ   |
|--|--|
| ดร.อาภาภรณ์ สุกุลการะเวก<br>ประธานกรรมการ  |     |
| ดร.พิศาล สุขวิสูตร<br>กรรมการ              |   |
| ผศ.ดร.ภัทริยา คำรงค์ศักดิ์<br>กรรมการ      |  |
| ดร.กัจปัญญา สุวรรณสุโข<br>อาจารย์ที่ปรึกษา |  |

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

|                    |   |
|--------------------|---|
| หัวข้อโครงการพิเศษ | การศึกษาระบบรวบรวมแสงพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบล่า  |
| ชื่อนักศึกษา       | นางสาวญาดา ไทรบุญจันทร์ รหัสนักศึกษา 55051486<br>นางสาวพรพิมล สีดา รหัสนักศึกษา 55051560<br>นางสาวภัสรา สอนมี รหัสนักศึกษา 55051580 |
| ปริญญา             | วิทยาศาสตร์บัณฑิต(ฟิสิกส์ประยุกต์)  |
| ภาควิชา            | ฟิสิกส์   |
| คณะ                | วิทยาศาสตร์   |
| มหาวิทยาลัย        | สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)   |
| ปีการศึกษา         | 2558  |
| อาจารย์ที่ปรึกษา   | ดร.กัจปัญญา สุวรรณสุขโข   |

### บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้ได้ทำการศึกษาศึกษาระบบรวบรวมแสงอาทิตย์แบบพาราโบล่า และสร้างระบบรวบรวมแสงที่มีขนาดของรางกว้าง 60 เซนติเมตร ยาว 150 เซนติเมตร เป็นจำนวน 3 ราง มีพื้นที่รับแสงอาทิตย์เท่ากับ 2.7 ตารางเมตร ที่ทำมาจากแผ่นสแตนเลสผิวกระจกเพื่อสะท้อนแสงที่ได้รับไปยังจุดโฟกัสที่เป็นท่อดูดซับรังสียาว 180 เซนติเมตร ซึ่งภายในถูกบรรจุด้วยท่อทองแดงเพื่อเป็นทางเดินของน้ำ โดยอัตราการไหลเชิงมวลของน้ำที่ไหลในท่อเฉลี่ยเป็น 0.0263 กิโลกรัมต่อวินาที และการทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพของระบบรวบรวมแสงแบบพาราโบล่าโดยอ้างอิงจากมาตรฐาน ASHRAE 93-77 พบว่าประสิทธิภาพของรวบรวมแสงมีประสิทธิภาพสูงสุดเท่ากับ 67.49% ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่ได้รับความเข้มรังสีอาทิตย์รวมสูงสุดเป็น 1077.17 วัตต์ต่อตารางเมตร สามารถผลิตน้ำร้อนที่มีอุณหภูมิสูงสุดเป็น 55.9 องศาเซลเซียส

คำสำคัญ : รวบรวมแสงแบบพาราโบล่า

|               |  |                     |
|---------------|--|---------------------|
| Title         | A Study of Solar Parabolic Trough Collector System       |                     |
| Students      | Miss Yada Saibunchan                                     | Student ID 55051486 |
|               | Miss Pornpimol Seeda                                     | Student ID 55051560 |
|               | Miss Phatsara Sonmee                                     | Student ID 55051580 |
| Degree        | Bachelor of Science (Applied Physics)                    |                     |
| Department    | Physics  |                     |
| Faculty       | Science  |                     |
| University    | King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang(KMITL) |                     |
| Academic Year | 2015   |                     |
| Advisor       | Dr.Kajpanya Suwansukho                                   |                     |

### Abstract

This special project studied and created a solar parabolic trough system. A parabolic trough having width 60 cm, length 150 cm. There are three parabolic troughs and having an aperture area  $2.7 \text{ m}^2$ . The reflector is a parabolic shaped mirror stainless steel. A parabolic reflector reflects and concentrates all the solar radiations on the absorber tube. The absorber tube is placed at the focal length of the parabolic trough collector, a length of 180 cm. Inside the absorber tube is a copper tube, water flows inside the copper tube with the average mass flow rate 0.0263 kg/s. Experiment to find the thermal efficiency of the parabolic trough solar collector according to ASHRAE standard 93-77. The results showed that the maximum thermal efficiency is 67.49% at the maximum solar intensity is  $1077.17 \text{ w/m}^2$  and can produce hot water has a maximum temperature of  $55.9^\circ\text{C}$

**Keyword :** Parabolic Trough Collector

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องมาจากความอนุเคราะห์และความร่วมมือจากบุคคล ดังต่อไปนี้

ขอขอบพระคุณ ดร.กัจปัญญา สุวรรณสุขโข อาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อาจารย์ที่ปรึกษางานวิจัย ที่คอยให้ปรึกษาดูแลอย่างใกล้ชิด เสนอแนะแนวทางแก้ไขปัญหา รวมทั้งตรวจทานความถูกต้องของงานวิจัยฉบับนี้ ให้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ กรรมการสอบโครงการพิเศษ คือ ดร.อาภาภรณ์ สกฤตกระเวก ดร.พิศาล สุขวิสูตร และ ผศ.ดร.ภทรียา ดำรงค์ศักดิ์ ที่ให้ข้อคิดเห็นและคำแนะนำช่วยเหลือในการทำโครงการพิเศษให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณอาจารย์จรินทร์ โพธิ์ไชยะ และอาจารย์สาโรจน์ ชูอำไพ ที่อาคารปฏิบัติการซ่อมสร้าง ภาควิชาฟิสิกส์ ที่คอยช่วยเหลือให้คำแนะนำในการใช้เครื่องมือและช่วยอำนวยความสะดวกให้เข้าใช้เครื่องมือในการจัดทำชิ้นส่วนของระบบรางพาราโบลาได้อย่างสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ เพื่อนๆภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ ที่คอยช่วยเหลือในระหว่างการทำงานและเป็นกำลังใจในการทำโครงการพิเศษให้สำเร็จไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ บิดา-มารดา ที่ให้ได้รับการศึกษา ตลอดจนคอยเลี้ยงดูและอบรมสั่งสอนและเป็นกำลังใจเป็นแรงผลักดันในการทำโครงการพิเศษให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี และบุคคลอื่นๆ ที่ไม่ได้กล่าวมา ผู้จัดทำโครงการขอขอบคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

ญาดา ไทรบุญจันทร์  
พรพิมล สีตา  
ภัสรา สอนมี

# สารบัญ

|  | หน้า      |
|--|-----------|
| บทคัดย่อภาษาไทย  | ก         |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ   | ข         |
| กิตติกรรมประกาศ  | ค         |
| สารบัญ   | ง         |
| สารบัญตาราง  | ฉ         |
| สารบัญรูป  | ช         |
| คำย่อ/สัญลักษณ์  | ญ         |
| <b>บทที่ 1 บทนำ</b>  | <b>1</b>  |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา   | 1         |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย  | 1         |
| 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย  | 2         |
| 1.4 ขั้นตอนของการวิจัยและวิธีการดำเนินการ                                    | 2         |
| 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ  | 2         |
| <b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>                                 | <b>3</b>  |
| 2.1 อุปกรณ์สะสมพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar collector)                           | 3         |
| 2.1.1 แบบแผ่นรับแสงแบบรวมแสง (Focusing Solar Collector)                      | 3         |
| 2.1.2 แบบแผ่นรับแสงแบบแผ่นเรียบ (Flat Plate Solar Collector)                 | 6         |
| 2.1.3 แบบแผ่นรับแสงแบบหลอดแก้วสุญญากาศ (Evacuated Tube Solar Collector)      | 7         |
| 2.2 พาราโบลา   | 8         |
| 2.3 อุปกรณ์สะสมพลังงานแสงอาทิตย์แบบรางพาราโบลิก (Parabolic trough collector) | 10        |
| 2.3.1 วัสดุสะท้อนแสงโค้งหน้าตัดรูปพาราโบลา                                   | 11        |
| 2.3.2 โครงสร้างรับวัสดุสะท้อนแสงโค้ง   | 12        |
| 2.3.3 ท่อดูดซับรังสี (Receiver)  | 12        |
| 2.3.4 สารทำงานในส่วนรวมแสงด้วยรางพาราโบลิก                                   | 13        |
| 2.4 วัสดุที่ใช้เป็นวัสดุสะท้อนแสงของรางรวมแสงอาทิตย์แบบพาราโบลา              | 13        |
| 2.4.1 สแตนเลส  | 13        |
| 2.5 ประสิทธิภาพของระบบรางรวมแสงอาทิตย์แบบพาราโบลา                            | 15        |
| 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง  | 15        |
| <b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย</b>   | <b>16</b> |
| 3.1 วัสดุและอุปกรณ์  | 16        |
| 3.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน  | 17        |
| 3.2.1 การคำนวณหาความโค้งของรางพาราโบลิก                                      | 17        |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

|   | หน้า      |
|---|-----------|
| 3.2.2 การออกแบบและการสร้าง  | 18        |
| 3.2.3 การทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพทางความร้อนของระบบรวบรวม<br>แสงอาทิตย์แบบพาราโบล่า  | 29        |
| <b>บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล</b>  | <b>31</b> |
| 4.1 หาอัตราการไหลเชิงมวลของน้ำที่ไหลภายในท่อของระบบ                                 | 31        |
| 4.2 วัดอุณหภูมิน้ำขาเข้าระบบ อุณหภูมิน้ำขาออกจากระบบ และความเข้ม<br>รังสีอาทิตย์รวม | 31        |
| <b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ</b>  | <b>34</b> |
| 5.1 สรุปผลการวิจัย  | 34        |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ  | 34        |
| <b>เอกสารอ้างอิง</b>  |           |
| <b>ภาคผนวก</b>  |           |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

| ตารางที่   | หน้า |
|--|------|
| 1.1 วิธีการดำเนินงาน   | 2    |
| 3.1 แสดงระยะแกน $y$ ที่สัมพันธ์กับความกว้างของรางพาราโบลา                            | 17   |
| 4.1 แสดงผลการทดลองเป็นเวลาในหน่วยวินาที และอัตราการไหลเชิงมวลของน้ำที่ได้จากการคำนวณ | 31   |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

| รูปที่   | หน้า |
|--|------|
| 2.1 แสดงลักษณะของระบบทำน้ำร้อนแบบแผ่นรับแสงแบบรางพาราโบลิก                         | 4    |
| 2.2 ส่วนประกอบของระบบผลิตน้ำร้อนแบบแผ่นรับแสงแบบรางพาราโบลิก                       | 4    |
| 2.3 การผลิตน้ำร้อนแบบหอคอยรวมแสง (Central Receiver Tower)                          | 5    |
| 2.4 การผลิตความร้อนโดยใช้จานรวมแสง (Parabolic Dish)                                | 5    |
| 2.5 แผ่นรับแสงแบบเลนส์สะท้อนรวมแสงแบบเส้นตรง (Linear Fresnel reflector)            | 6    |
| 2.6 ระบบผลิตน้ำร้อนแบบแผ่นรับแสงแบบแผ่นเรียบ                                       | 6    |
| 2.7 ระบบผลิตน้ำร้อนแบบแผ่นรับแสงแบบหลอดแก้วสุญญากาศ                                | 7    |
| 2.8 ส่วนประกอบของแผ่นรับแสงแบบหลอดแก้วสุญญากาศ                                     | 7    |
| 2.9 แสดงส่วนประกอบของพาราโบลา  | 8    |
| 2.10 รูปพาราโบลา   | 8    |
| 2.11 ลักษณะหน้าตัดพาราโบลาของกระจกหรือวัสดุสะท้อนแสง                               | 9    |
| 2.12 ส่วนของโค้งพาราโบลาที่ระยะโฟกัสต่างๆ และมีเส้นผ่านศูนย์กลางของพาราโบลาเท่ากัน | 10   |
| 2.13 การกระทบลงบนจุดโฟกัสของพาราโบลา   | 10   |
| 2.14 ลักษณะวัสดุสะท้อนแสงโค้งหน้าตัดรูปพาราโบลา                                    | 11   |
| 2.15 โครงสร้างของหน้าตัดพาราโบลาที่ใช้ในการออกแบบ                                  | 11   |
| 2.16 แสดงโครงสร้างรับวัสดุสะท้อนแสงโค้งและท่อดูดซับ                                | 12   |
| 2.17 แสดงลักษณะ และส่วนประกอบของท่อดูดซับรังสี (Receiver Tube)                     | 12   |
| 3.1 แสดงลักษณะของรางพาราโบลิกที่ได้จากการคำนวณ                                     | 18   |
| 3.2 การออกแบบโครงสร้างของ Rib ที่คำนวณความยาวโฟกัสเรียบร้อยแล้ว                    | 18   |
| 3.3 แสดงส่วนโครงสร้าง Inner ball bearing   | 19   |
| 3.4 แสดงส่วนโครงสร้าง Outer ball bearing   | 19   |
| 3.5 โครงสร้างต้นแบบส่วน Rib ,Outer ball bearing และ Inner ball bearing             | 20   |
| 3.6 แสดงขั้นตอนการแบ่งไม้ตามขนาดแต่ละชิ้นส่วน                                      | 20   |
| 3.7 แสดงขั้นตอนการทาบแบบไม้กับไม้จริง  | 20   |
| 3.8 แสดงการตัดชิ้นไม้  | 21   |
| 3.9 (ก) การเจาะรูไม้เพื่อใช้สำหรับยึดน็อต  | 21   |
| (ข) การเจาะวงกลมในส่วน Inner ball และส่วนOuter ball bearing                        | 21   |
| 3.10 แสดงการขัดไม้ด้วยเครื่องขัดกระดาษทราย   | 21   |
| 3.11 (ก) การทาสีไม้  | 22   |
| (ข) ไม้ที่ผ่านการทาสีแล้วนำไปตากแห้ง   | 22   |
| 3.12 ลักษณะการเรียงส่วน Rib เพื่อเตรียมประกอบ                                      | 22   |
| 3.13 (ก.) การประกอบโครงสร้างของรางพาราโบลิกด้วยโปรแกรม Solid work                  | 22   |
| (ข.) การประกอบโครงสร้างของรางพาราโบลิก   | 22   |

เอกสาร 3.14 ลักษณะอลูมิเนียมฉากประกบกับมุมของรางพาราโบลิกด้วยโปรแกรม Solid work โยชนัดำ 23 การค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

| รูปที่  | หน้า |
|---|------|
| 3.15 การยึดอลูมิเนียมฉากกับมุมของรางพาราโบลิก   | 23   |
| 3.16 การยึดอลูมิเนียมเส้นที่ด้านล่างของรางพาราโบลิกด้วยโปรแกรม Solid work   | 23   |
| 3.17 อลูมิเนียมเส้นที่ยึดด้านล่างของรางพาราโบลิก  | 24   |
| 3.18 สอดแผ่นสะท้อนแสงกับโครงสร้างรางพาราโบลิกด้วยโปรแกรม Solid work   | 24   |
| 3.19 ติดส่วน Inner ball baring เข้ากับโครงสร้างด้วยโปรแกรม Solid work   | 24   |
| 3.20 ติดลูกปืนกับส่วน Inner ball baring ทั้งสองด้านด้วยโปรแกรม Solid work   | 25   |
| 3.21 (ก.) รางพาราโบลิกที่ประกอบ Rib, Inner ball baring และ Outer ball baring สมบูรณ์ด้วยโปรแกรม Solid work  | 25   |
| (ข.) รางพาราโบลิกที่ประกอบ Rib, Inner ball baring และ Outer ball baring สมบูรณ์   | 25   |
| 3.22 แสดงขนาดโครงสร้างรับน้ำหนักรางพาราโบลิก  | 26   |
| 3.23 ติดตั้งรางพาราโบลิก  | 26   |
| 3.23 ติดตั้งท่อแก้วสุญญากาศเข้ากับรางพาราโบลิก  | 26   |
| 3.24 ท่อทองแดงที่ตัดเป็นรูปตัว U แล้ว   | 27   |
| 3.25 ต่อข้อต่อฉากทองเหลืองเข้ากับปลายท่อทองแดงแต่ละด้าน   | 27   |
| 3.26 ต่อข้อต่อตรงทองเหลืองเข้ากับปลายสายยางทนความร้อนแต่ละด้าน  | 27   |
| 3.27 ต่ออนุกรมท่อทองแดงทั้ง 3 ท่อเข้าด้วยกัน  | 28   |
| 3.28 ปิดปากท่อแก้วสุญญากาศด้วยการอัดซิลิโคน   | 28   |
| 3.29 เดินระบบท่อน้ำเข้า และท่อน้ำออก  | 28   |
| 3.30 รางรวมแสงแบบพาราโบลิกสมบูรณ์   | 29   |
| 3.31 แสดงเทอร์โมคัปเปิล ชนิดเค และเทอร์โมมิเตอร์ VA8060   | 30   |
| 3.32 ไพรานอมิเตอร์  | 30   |
| 4.1 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างอุณหภูมิน้ำขาเข้า ( $T_i$ ) และอุณหภูมิน้ำขาออกจากระบบ ( $T_o$ ) ตั้งแต่เวลา 09.00 น.-16.00 น. ทุกๆ 10 นาที เมื่อวันที่ 26 พฤษภาคม 2559                          | 32   |
| 4.2 กราฟแสดงความเข้มรังสีอาทิตย์รวม ( $I_T$ ) ตั้งแต่เวลา 09.00 น.-16.00 น. เมื่อวันที่ 26 พฤษภาคม 2559   | 32   |
| 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มรังสีอาทิตย์รวม ( $I_T$ ) และประสิทธิภาพทางความร้อนของรางรวมแสง ( $\eta$ ) ที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา ตั้งแต่ 09.00 น. – 16.00 น. เมื่อวันที่ 26 พฤษภาคม 2559 | 33   |

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันเป็นที่ทราบกันดีแล้วว่ามีความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าอย่างต่อเนื่องและมากขึ้น ซึ่งสวนทางกับปริมาณเชื้อเพลิงที่มีอยู่อย่างจำกัด และกำลังประสพภาวะขาดแคลน ไม่ว่าจะเป็นเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติ น้ำมัน และถ่านหิน อีกทั้งยังสามารถสร้างปัญหาให้กับโลกได้ หากไม่ได้รับการควบคุมการเผาไหม้ที่ดี หรืออาจจะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เช่นอากาศเป็นพิษ ฝนกรด และทำให้โลกร้อนด้วย ดังนั้นการแสวงหาพลังงานทดแทนเพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้าจำเป็นต้องเป็นพลังงานสะอาด ไม่สร้างมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม “พลังงานแสงอาทิตย์” จึงเป็นพลังงานทดแทนที่ได้รับความสนใจ และเหมาะต่อการทำการศึกษาค้นคว้าอย่างต่อเนื่อง เมื่อแหล่งพลังงานอื่นๆ ใกล้จะหมดประเทศไทยซึ่งตั้งอยู่ใกล้เส้นศูนย์สูตร และมีศักยภาพทางด้านพลังงานแสงอาทิตย์เป็นอย่างมากเมื่อเทียบกับประเทศอื่นๆ หากมีการพัฒนาเทคโนโลยีทางพลังงานแสงอาทิตย์ขึ้นใช้เองภายในประเทศจะเป็นแหล่งพลังงานทางเลือกหนึ่งที่สามารถทำให้อาณาเขตของประเทศไม่ต้องซื้อพลังงานในรูปแบบอื่น

อุปกรณ์สำคัญที่จะทำให้สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ได้ คือ “เซลล์แสงอาทิตย์” หรือ Solar cell หรืออาจเรียกว่า PV (Photovoltaic หมายถึง แรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากแสง) และจุดเด่นก็คือสามารถผลิตไฟฟ้าได้ทุกที่มีแสงอาทิตย์ส่องถึง และสามารถเก็บพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตขึ้นมาได้โดยบรรจุไว้ในแบตเตอรี่ แต่การใช้ประโยชน์จากแสงอาทิตย์นั้นนอกจากจะได้จากความเข้มแสงแล้ว ยังสามารถนำความร้อนจากแสงอาทิตย์มาใช้ได้อีกด้วย ดังนั้นโครงการพิเศษนี้จึงทำการศึกษา ออกแบบ และประดิษฐ์อุปกรณ์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการนำพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ โดยทำการรวมแสงไว้ที่ตัวรับ (Solar collector) โดยใช้วัสดุสะท้อนแสงแบบรางพาราโบลา (Parabolic Troughs) เพื่อทำหน้าที่รวบรวมพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ และสะท้อนไปยังท่อที่ต่อขนานกับแนวราง เพื่อทำการถ่ายเทความร้อนให้กับของเหลวที่ไหลผ่านท่อ ทำให้ได้น้ำที่ร้อนขึ้นจนเป็นไอ ซึ่งทั้งนี้ยังสามารถพัฒนาศักยภาพการผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ระบบรวมความร้อนแบบรางพาราโบลาก็ได้อีกด้วย

เนื่องจากในห้องปฏิบัติการพลังงานทางเลือก มีการศึกษาเกี่ยวกับประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ และต้องการศึกษาให้มีความหลากหลายรูปแบบมากขึ้น จึงทำการศึกษา ออกแบบ และประดิษฐ์รางรวมแสงแบบพาราโบลาลิ้น และทำการศึกษาประสิทธิภาพ เพื่อนำไปใช้ในการเรียนการสอนได้

### 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวกับอุปกรณ์ หรือตัวรับรวมแสง (Solar collector) และวัสดุสะท้อนแสงแบบรางพาราโบลา (Parabolic Troughs)
2. เพื่อศึกษา ออกแบบ และประดิษฐ์รางรวมแสงแบบพาราโบลา
3. เพื่อวัดประสิทธิภาพของรางรวมแสงแบบพาราโบลาที่ประดิษฐ์ขึ้น
4. เพื่อให้ได้เครื่องมือที่สามารถนำไปใช้ในห้องปฏิบัติการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ประยุกต์ใช้วัสดุ และต้นทุนที่มีอยู่อย่างจำกัดเพื่อประดิษฐ์รางรวมแสงแบบพาราโบลิก
2. วัดประสิทธิภาพของรางรวมแสงแบบพาราโบลิก โดยใช้อุณหภูมิของของเหลวที่ไหลผ่านเป็นตัววัด

### 1.4 ขั้นตอนของการวิจัยและวิธีการดำเนินการ

ตารางที่ 1.1 วิธีการดำเนินงาน

| ขั้นตอนการวิจัย  | ปี 2558 |      |      |      |      | ปี 2559 |      |       |       |      |
|--|---------|------|------|------|------|---------|------|-------|-------|------|
|  | ส.ค.    | ก.ย. | ต.ค. | พ.ย. | ธ.ค. | ม.ค.    | ก.พ. | มี.ค. | เม.ย. | พ.ค. |
| 1. ศึกษาทฤษฎีและเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง                                    |         |      |      |      |      |         |      |       |       |      |
| 2. ศึกษาการทำงานและการออกแบบรางรวมแสงแบบพาราโบลิก                              |         |      |      |      |      |         |      |       |       |      |
| 3. ออกแบบและพัฒนารางรวมแสงแบบพาราโบลิก   |         |      |      |      |      |         |      |       |       |      |
| 4. วัดประสิทธิภาพของรางรวมแสงแบบพาราโบลิกที่ประดิษฐ์ขึ้นพร้อมทั้งปรับปรุงแก้ไข |         |      |      |      |      |         |      |       |       |      |
| 5. รวบรวมข้อมูลทำรูปเล่ม   |         |      |      |      |      |         |      |       |       |      |

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับอุปกรณ์ หรือตัวรับรวมแสง (Solar collector) และวัสดุสะท้อนแสงแบบรางพาราโบลิก (Parabolic Troughs)
2. สามารถออกแบบ และประดิษฐ์รางรวมแสงแบบพาราโบลิกได้
3. สามารถวิเคราะห์ และพัฒนารางรวมแสงแบบพาราโบลิกให้มีประสิทธิภาพสามารถใช้งานได้จริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 อุปกรณ์สะสมพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar collector)

ระบบเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ในช่วงรังสีคลื่นสั้น (short wave radiation) ให้เป็นพลังงานความร้อนผ่านตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (solar collector) โดยอาศัยหลักการเบื้องต้นของแสง ซึ่งเมื่อตกกระทบวัตถุใดๆ จะเกิดปรากฏการณ์เชิงแสง 4 รูปแบบ ได้แก่ การดูดกลืนแสง (absorption) การเปล่งแสง (emission) การสะท้อนแสง (reflection) และการส่องผ่าน (transmission) โดยวัสดุต่างชนิดกันจะมีสมบัติเชิงแสงต่างกัน การเลือกวัสดุที่มีสมบัติเชิงแสงที่เหมาะสมมาสร้างเป็นระบบทำความร้อน ทำให้ใช้ประโยชน์ได้ในหลากหลายลักษณะ เช่น การผลิตน้ำร้อน การสร้างความอบอุ่นในอาคารบ้านเรือนในเขตหนาว กระบวนการอบแห้ง หรือการผลิตกระแสไฟฟ้า เป็นต้น การใช้ประโยชน์จากพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อทำความร้อนเริ่มมีบันทึกเป็นหลักฐานครั้งแรกในปี ค.ศ. 1774 โดยนักเคมีชาวฝรั่งเศสชื่อ อังตวน ลาวัวซิเย (Antoine Lavoisier) ผู้ประดิษฐ์เครื่องจักรที่ใช้รวมแสงอาทิตย์เพื่อให้ความร้อนในการทดลองทางเคมี

Solar collector คืออุปกรณ์ที่ประดิษฐ์ขึ้นเพื่อใช้ในการดูดซับและสะสมพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์และถ่ายเทความร้อนไปให้ตัวกลาง (medium) ที่ลำเลียงไปตามระบบท่อ ส่วนประกอบหลักของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ได้แก่

1. ตัวดูดกลืน (absorber) ทำหน้าที่รับความร้อนจากแสงอาทิตย์ ทำจากวัสดุที่มีคุณสมบัติดูดกลืนรังสีคลื่นสั้น (short wave radiation) ได้ดี สะท้อนแสงน้อย อัตราการปลดปล่อยพลังงานในรูปร่างคลื่นยาว (long wave radiation) ต่ำและไม่ยอมให้แสงส่องผ่าน ได้แก่ โลหะทองแดงหรืออลูมิเนียม เป็นต้น
2. อุปกรณ์นำความร้อน (heat carrier) ประกอบด้วยตัวกลางและระบบท่อนำความร้อน ทำหน้าที่ถ่ายเทความร้อนจากตัวดูดกลืนไปยังอุปกรณ์ปลายทาง
3. อุปกรณ์เก็บความร้อน (energy storage) ทำหน้าที่เก็บสะสมความร้อนก่อนที่จะนำไปใช้งาน ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่มีใช้กันอยู่ในปัจจุบันแบ่งตามรูปร่างของตัวเก็บรังสี ได้แก่ ตัวเก็บรังสีแบบแผ่นเรียบแบบท่อ และแบบรางพาราโบลิก

ในปัจจุบันตัวสะสมพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar collector) เป็นเทคโนโลยีสำหรับผลิตน้ำร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ คือมีการถ่ายเทความร้อนไปให้ตัวกลาง (medium) ที่เป็นน้ำ ซึ่งตัวสะสมพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar collector) แบ่งได้ 3 แบบดังนี้

#### 2.1.1 แบบแผ่นรับแสงแบบรวมแสง (Focusing Solar Collector)

บางครั้งเราเรียกเทคโนโลยีนี้ว่า Concentrated Solar Thermal ซึ่งการทำน้ำร้อนแบบนี้จะใช้วัสดุรวมแสงหรือสะท้อนแสง โดยทั่วไปจะใช้กระจกสะท้อนแสงไปยังวัสดุรับแสงและติดตั้งตามดวงอาทิตย์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของระบบ การทำน้ำร้อนแบบนี้จะได้น้ำอุณหภูมิสูงมาก ซึ่งจำแนกได้ตามชนิดของการรวมแสงแบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ

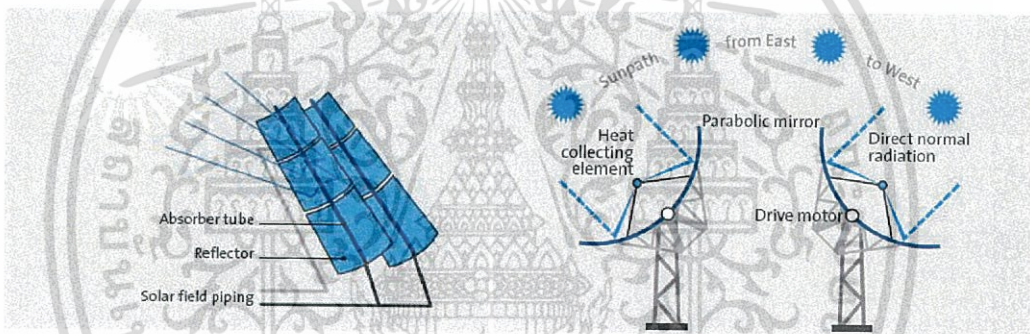
1. การรวมแสงเป็นจุด (point-focus solar collector) ได้แก่ระบบหอคอยรวมแสง (Central receivers tower) และจานรวมแสง (parabolic dishes)

2. การรวมแสงเป็นเส้น (line-focus solar collector) ได้แก่เลนซ์สะท้อนรวมแสง (Fresnel reflector) และรางรวมแสง (parabolic troughs)

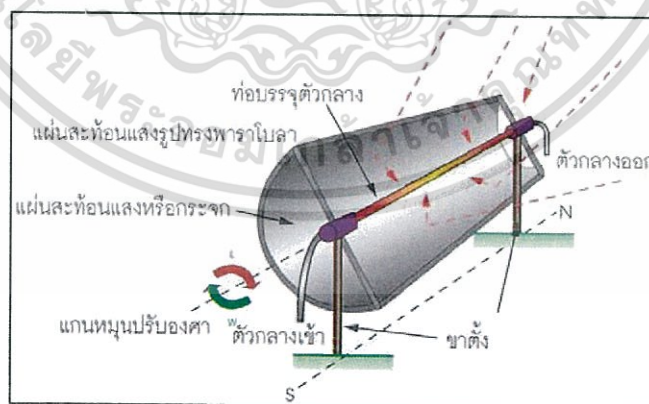
แผ่นรับแสงแบบรวมแสงสามารถแบ่งได้ 4 แบบ ดังนี้

1. แบบใช้กระจกโค้งรวมแสง หรือแบบรางพาราโบลิก (Parabolic Troughs)

วิธีนี้จะใช้แผ่นกระจกหรือวัสดุสะท้อนแสงโค้งหน้าตัดรูปพาราโบล่า มีลักษณะเป็นรางยาว ทำหน้าที่รวมพลังงานแสงอาทิตย์ไปยังท่อหรือวัสดุรับแสงยาวขนานกับรางตรงตำแหน่งโฟกัสของรางพาราโบล่า เพื่อถ่ายเทพลังงานความร้อนให้กับน้ำหรือของเหลวซึ่งเป็นสารทำงาน เพื่อทำให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นและสามารถนำไปใช้งานได้ ดังรูปที่ 2.1 โดยการทำความร้อนด้วยวิธีนี้สามารถทำให้มีอุณหภูมิสูงถึง 290-400 องศาเซลเซียส (กรณีที่ใช้ น้ำ เป็นตัวกลาง) ถ้าติดตั้งแผ่นรับแสงแบบรางพาราโบลิกจำนวนมากพอ ความร้อนที่เกิดขึ้นจะทำให้น้ำกลายเป็นไอน้ำแรงดันสูงป้อนเข้าสู่โรงไฟฟ้าพลังความร้อนจากแสงอาทิตย์เพื่อนำไปผลิตกระแสไฟฟ้าต่อไป แผ่นรับแสงแบบรางพาราโบลิกยังสามารถออกแบบให้มีระบบติดตามตำแหน่งของดวงอาทิตย์บนท้องฟ้าเพื่อรับแสงอาทิตย์จากรังสีตรง (direct radiation) ความเข้มสูงได้ตลอดทั้งวัน เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการแปรรูปพลังงานให้สูงขึ้นได้อีกด้วย



รูปที่ 2.1 แสดงลักษณะของระบบทำน้ำร้อนแบบแผ่นรับแสงแบบรางพาราโบลิก

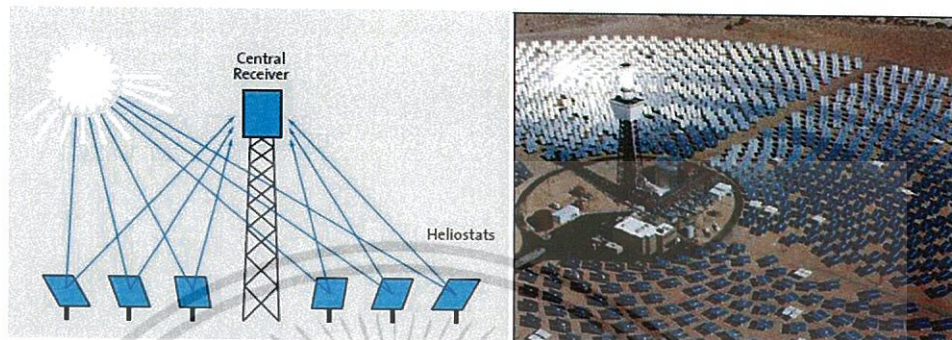


รูปที่ 2.2 ส่วนประกอบของระบบผลิตน้ำร้อนแบบแผ่นรับแสงแบบรางพาราโบลิก

2. แบบหอคอยรวมแสง (Central Receiver Tower)

วิธีการนี้เป็นการรวมพลังงานแสงอาทิตย์จากแผ่นกระจกจำนวนมาก แล้วสะท้อนไปยังตัวรับพลังงานซึ่งตั้งอยู่บนหอคอยบรรจุด้วยน้ำหรือสารทำงาน กระจกสะท้อนแสงเรียกว่า เฮลิโอสแตท จะเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สว่นไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

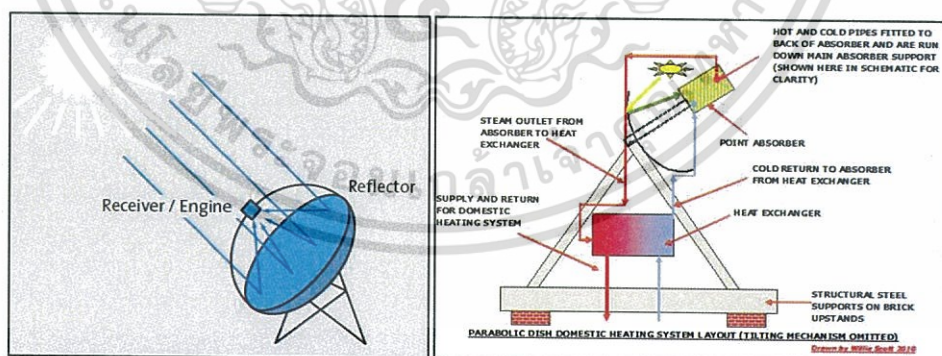
ติดตั้งรอบ ๆ หอรับความร้อน ดังแสดงในรูปที่ 2.3 การทำน้ำร้อนด้วยวิธีนี้ไม่เหมาะกับการนำมาทำน้ำร้อนโดยตรงเหมือนกับแบบรางพาราโบลิก เนื่องจากมีอุณหภูมิสูงมาก ประมาณ 1,000 องศาเซลเซียส การใช้งานอาจผ่านการผลิตไฟฟ้าโดยกังหันไอน้ำ และผ่านระบบทำความเย็นแบบดูดซึม และสุดท้ายผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อผลิตน้ำร้อนแล้วนำไปใช้งาน



รูปที่ 2.3 การผลิตน้ำร้อนแบบหอคอยรวมแสง (Central Receiver Tower)

### 3. แบบจานรวมแสง (Parabolic Dish)

การผลิตความร้อนแบบนี้อาศัยการรวมแสงโดยใช้วัสดุสะท้อนแสงแบบจานรวมแสงรูปทรงพาราโบลิก หรือกระจกโค้งหลายแผ่นจัดเรียงให้มีการสะท้อนและรวมแสงไปยังจุดโฟกัส ซึ่งมีตัวรับพลังงานแสงอาทิตย์ และมักติดตั้งระบบติดตามดวงอาทิตย์เพื่อให้ระบบทำงานอย่างมีประสิทธิภาพ ดังแสดงในรูปที่ 2.4 การรวมแสงแบบนี้ปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้เพื่อผลิตไฟฟ้าโดยใช้เครื่องยนต์สเตอร์ลิงวางไว้ยังตำแหน่งโฟกัส ซึ่งสามารถทำอุณหภูมิได้สูงถึง 1,500 องศาเซลเซียส ส่วนการใช้สำหรับงานต้มน้ำมักไม่นิยมเนื่องจากอุณหภูมิสูงมาก และรูปแบบไม่เหมาะกับการใช้ต้มน้ำสำหรับการทำน้ำร้อน



รูปที่ 2.4 การผลิตความร้อนโดยใช้จานรวมแสง (Parabolic Dish)

### 4. เลนส์สะท้อนรวมแสงแบบเส้นตรง (Linear Fresnel reflector)

เทคโนโลยีนี้มีลักษณะคล้ายกับแบบรางพาราโบลิก แต่แตกต่างกันตรงกระจกที่ใช้จะมีลักษณะเป็นแผ่นราบ ไม่มีความโค้งงอ แสงอาทิตย์จะถูกสะท้อนจากกระจกแล้วมารวมที่ตัวรับ ซึ่งจะวางเป็นแนวยาวตามกระจก และจะมีกระจกครอบไว้ด้านบนอีกชั้น เพื่อที่จะทำการรวมแสงที่ไม่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

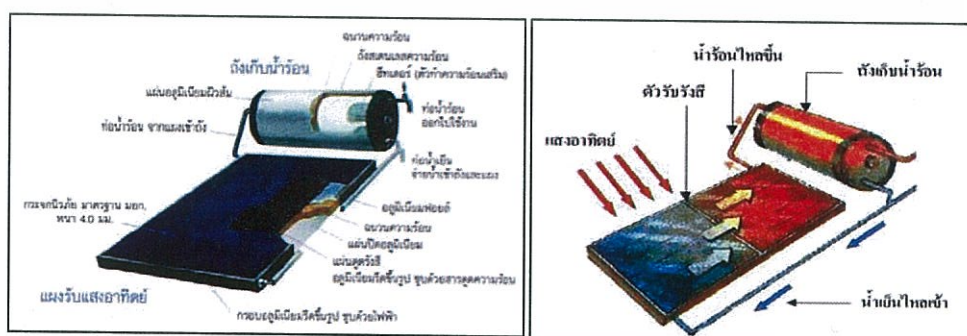
ส่งไปที่ตัวรับอีกกรอบ เทคโนโลยีนี้มีข้อดี คือ มีราคาการผลิตและโครงสร้างที่ถูกกว่า และพื้นที่ของกระจกต่อตัวรับมีปริมาณมากกว่า ทำให้สามารถรวมรังสีจากแสงได้ในปริมาณมาก เทคโนโลยีนี้สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ตั้งแต่ 1.4 เมกะวัตต์ ไปจนถึง 44 เมกะวัตต์



รูปที่ 2.5 แผ่นรับแสงแบบเลนส์สะท้อนรวมแสงแบบเส้นตรง (Linear Fresnel reflector)

### 2.1.2 แบบแผ่นรับแสงแบบแผ่นเรียบ (Flat Plate Solar Collector)

ตัวสะสมพลังงานแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบอาศัยการรับรังสีจากดวงอาทิตย์โดยตรงและแลกเปลี่ยนความร้อนให้กับน้ำที่เก็บไว้ในถังเก็บ สามารถผลิตน้ำร้อนเพื่อใช้ประโยชน์ในช่วงอุณหภูมิไม่เกิน 100 องศาเซลเซียส เช่น การผลิตน้ำร้อนเพื่อใช้ในอาคารบ้านเรือน หรือผลิตน้ำอุ่นสำหรับสระว่ายน้ำ เป็นต้น แผ่นรับแสงแบบนี้จะไม่มีอุปกรณ์ให้เคลื่อนที่ตามดวงอาทิตย์ ระบบผลิตน้ำร้อนแบบแผ่นเรียบประกอบด้วยตัวดูดกลืนที่เป็นแผ่นเรียบรับแสงทำด้วยทองแดงหรืออลูมิเนียม และมีระบบท่อ (riser tube) เชื่อมติดอยู่ด้านบนของแผ่นรับแสง ปิดทับด้วยกระจกหรือพลาสติกด้านบน (glazing) แผ่นรับแสงเคลือบด้วยสารพิเศษที่มีคุณสมบัติเลือกรังสี (selective coating) ช่วยเพิ่มการดูดกลืนแสงอาทิตย์ (absorption) ทั้งจากรังสีตรง (direct radiation) และรังสีกระจาย (diffuse radiation) และลดอัตราการปลดปล่อยพลังงานในรูปของแสง (emission) ตัวแผงโลหะและขอบทั้งสี่ด้านหุ้มด้วยฉนวน เพื่อลดการสูญเสียพลังงานจากการนำความร้อน (conductive heat loss) เมื่อแสงอาทิตย์ส่องเข้ามาในแผงโลหะ พลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นจากแผ่นดูดกลืนจะส่งผ่านให้ตัวกลาง (medium) ที่ไหลอยู่ภายในท่อ เช่น น้ำหรือของเหลวชนิดอื่น ดังแสดงในรูปที่ 2.6 โดยหลักการการทำงานของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นแบบไหลเวียนธรรมชาติคือเมื่อน้ำได้รับพลังงานความร้อนจนมีอุณหภูมิสูงขึ้นจะเคลื่อนที่ไปด้านบน หรือลอยไปด้านบน

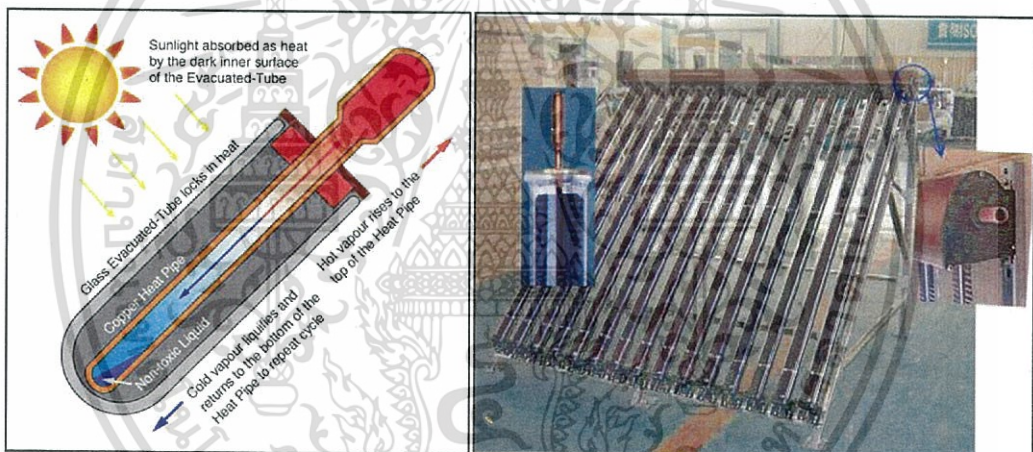


รูปที่ 2.6 ระบบผลิตน้ำร้อนแบบแผ่นรับแสงแบบแผ่นเรียบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.3 แบบแผ่นรับแสงแบบหลอดแก้วสุญญากาศ (Evacuated Tube Solar Collector)

เป็นเทคโนโลยีที่ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อทดแทนเครื่องทำน้ำร้อนแบบเดิม การผลิตน้ำร้อนแบบหลอดแก้วสุญญากาศมีประสิทธิภาพสูงแม้ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ต่ำ และสามารถผลิตความร้อนเพื่อใช้ประโยชน์ในช่วงอุณหภูมิ 90-200 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ประกอบด้วยหลอดแก้วชั้นนอกชนิดโดร์เนีย (Dornier type หรือ heat pipe evacuated tube) และท่อชั้นในทำจากโลหะทองแดงหรืออลูมิเนียม ติดอยู่กับครีบบ (fin) ซึ่งเคลือบด้วยสารพิเศษที่มีคุณสมบัติเลือกรังสี (selective coating) ทำหน้าที่เป็นตัวดูดกลืน (absorber) โดยมีตัวกลาง (medium) เป็นของเหลว เช่น น้ำ ไทลเรียมอยู่ภายในท่อชั้นใน ช่องว่างระหว่างหลอดแก้วชั้นนอกกับท่อโลหะชั้นในเป็นสุญญากาศ เพื่อลดการสูญเสียพลังงานจากการนำและการพาความร้อน (conductive และ convective heat losses) ทำให้ประสิทธิภาพการแปรรูปพลังงานสูงกว่าตัวเก็บรังสีแบบแผ่นเรียบ ตัวเก็บรังสีแบบท่ออีกรูปแบบหนึ่งประกอบด้วยหลอดสองชั้นชนิดเดวาร์ (Dewar type หรือ all glass evacuated tube) ชั้นนอกเป็นหลอดแก้วใส ผิวหลอดแก้วชั้นในเคลือบด้วยสารพิเศษที่มีคุณสมบัติเลือกรังสี ทำหน้าที่เป็นตัวดูดกลืน ช่องว่างระหว่างหลอดแก้วทั้งสองชั้นเป็นสุญญากาศ เช่นเดียวกับชนิดโดร์เนีย



รูปที่ 2.7 ระบบผลิตน้ำร้อนแบบแผ่นรับแสงแบบหลอดแก้วสุญญากาศ



รูปที่ 2.8 ส่วนประกอบของแผ่นรับแสงแบบหลอดแก้วสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

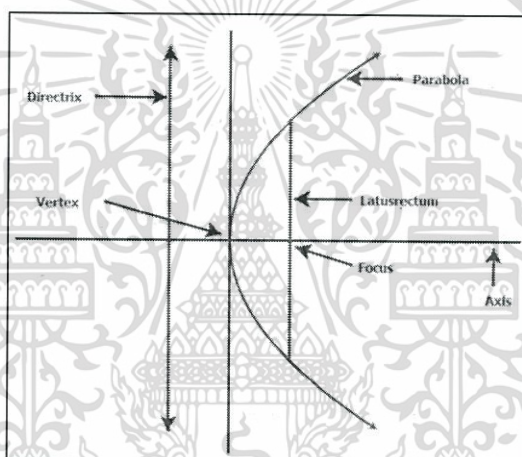
## 2.2 พาราโบลา (Parabola)

พาราโบลา (Parabola) คือ เซตของจุดทุกจุดบนระนาบ ซึ่งอยู่ห่างจากจุดคงที่จุดหนึ่ง และห่างจากเส้นคงที่เส้นหนึ่งเป็นระยะทางเท่ากัน

เรียกจุดคงที่นั้นว่าจุดโฟกัส F และเรียกเส้นคงที่ว่าเส้นกำกับ หรือเส้นไดเรกทริกซ์ (Directrix)

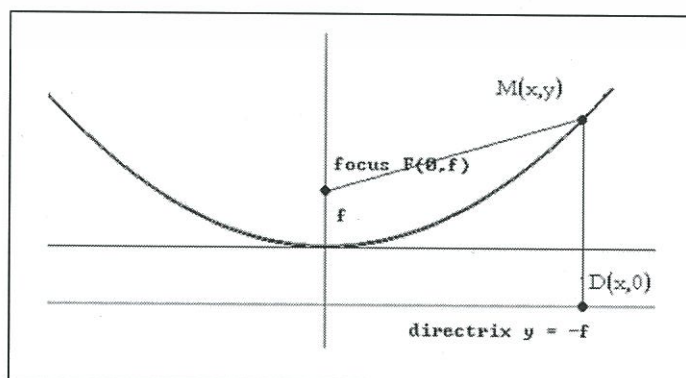
โดยพาราโบลามีส่วนประกอบที่สำคัญ ดังนี้

- 1.) เส้นบังคับ หรือไดเรกทริกซ์ (Directrix) คือเส้นคงที่ของพาราโบลา
- 2.) จุดโฟกัส F (Focus) คือจุดคงที่ของพาราโบลา
- 3.) จุดยอด (Vertex) คือจุดที่เส้นพาราโบลาตัดกับแกนของพาราโบลา
- 4.) เลตัสเรกตรัม (Latus rectum) คือส่วนของเส้นตรงที่ลากผ่านจุดโฟกัส มีจุดปลายทั้งสองอยู่บนพาราโบลา เลตัสเรกตรัมจะตั้งฉากกับแกนของพาราโบลา และขนานกับไดเรกทริกซ์
- 5.) แกนของพาราโบลา (Axis) คือเส้นตรงที่ลากผ่านจุดโฟกัส และจุดยอด ตั้งฉากกับไดเรกทริกซ์



รูปที่ 2.9 แสดงส่วนประกอบของพาราโบลา

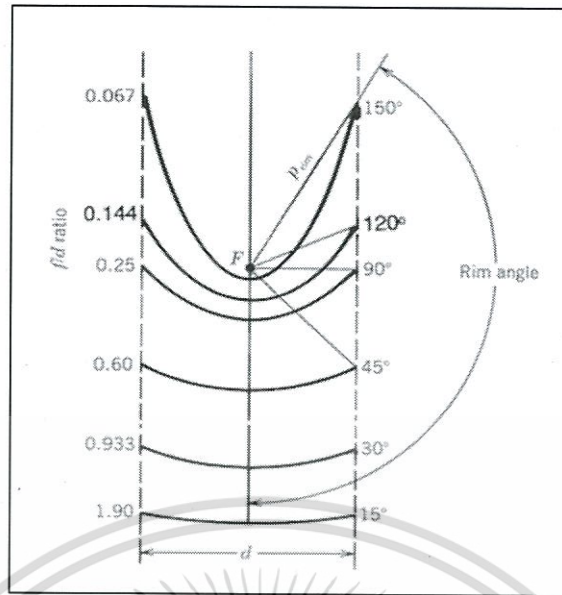
สมการพาราโบลาในกรณีที่พาราโบลามีแกนของพาราโบลารขนานกับแกน  $y$  รูปที่ 2.10 แสดงรูปพาราโบลา โดยที่จุดยอดอยู่ที่พิกัด  $(0,0)$  จุดโฟกัสอยู่ที่จุด  $F$  ที่พิกัด  $(0,f)$  และเส้นไดเรกทริกซ์คือ  $y = -f$



รูปที่ 2.10 รูปพาราโบลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

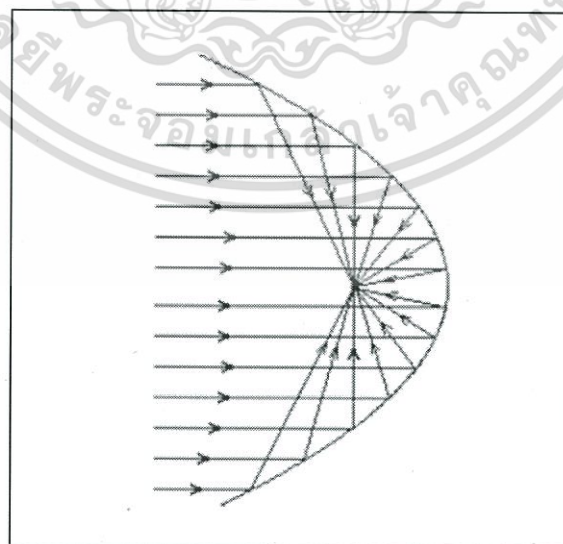




รูปที่ 2.12 ส่วนของโค้งพาราโบลาที่ระยะโฟกัสต่างๆ และมีเส้นผ่านศูนย์กลางของพาราโบลาเท่ากัน

### 2.3 อุปกรณ์สะสมพลังงานแสงอาทิตย์แบบรางพาราโบลิก (Parabolic trough collector)

ตัวสะท้อนรังสีรูปพาราโบลิก (Parabolic) หรือพาราโบลอยด์ (Paraboloids) สามารถพบเห็นได้จากการประยุกต์ใช้ในจานดาวเทียม ตัวรับรังสีรูปพาราโบลามีคุณสมบัติในการสะท้อนรังสีขนานที่ตกกระทบบนพื้นผิวตัวรับรังสีให้รวมกันที่จุดโฟกัส หรือกรณีตรงกันข้าม ที่ตำแหน่งการเกิดรังสีที่จุดโฟกัส จะทำให้เกิดการสะท้อนรังสีออกไปในแนวขนาน ดังรูปที่ 2.13 แสดงให้เห็นว่ารังสีขนานที่เดินทางจากด้านซ้ายตกกระทบบนตัวรับรังสีแล้วเดินทางไปที่จุดโฟกัสเพียงจุดเดียว รังสีที่สะท้อนไปรวมกันที่ตำแหน่งจุดโฟกัสนี้มีความเข้มข้นของรังสีมากที่สุด



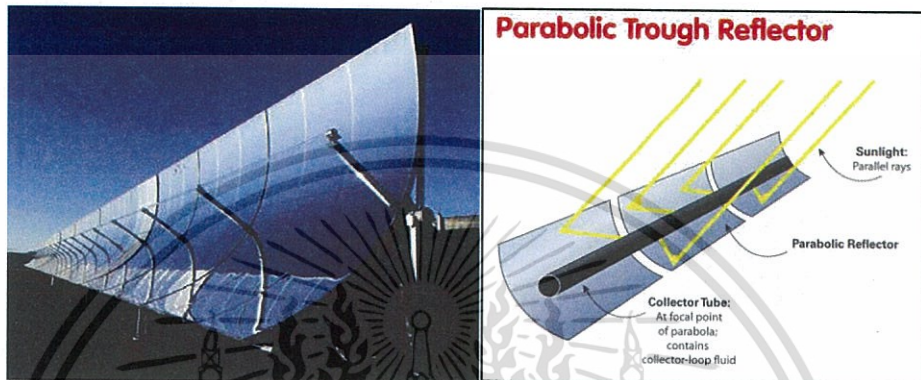
รูปที่ 2.13 การกระทบบนจุดโฟกัสของพาราโบล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนรวมแสงด้วยรางพาราโบลิกจะประกอบด้วยส่วนสำคัญ ดังนี้

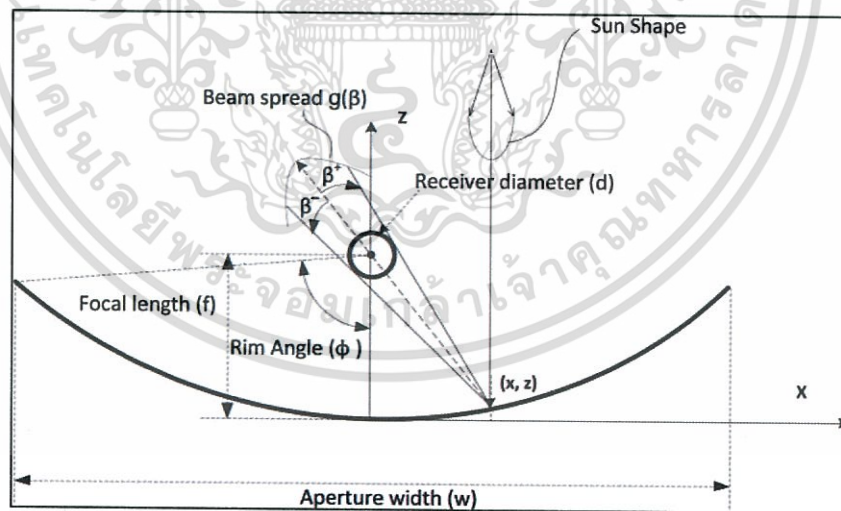
### 2.3.1 วัสดุสะท้อนแสงโค้งหน้าตัดรูปพาราโบลา

รูปทรงพาราโบลามีลักษณะโค้ง ประกอบด้วยส่วนสำคัญหลายส่วน คือ จุดโฟกัส จุดยอดของพาราโบลา แกนพาราโบลา ไดร็อยทริก และเลตส์เรกตัม ส่วนนี้จะมีหน้าที่รวมพลังงานแสงอาทิตย์แล้วสะท้อนไปยังท่อดูดซับรังสีตรงตำแหน่งโฟกัสของรางพาราโบล่า เพื่อถ่ายเทพลังงานความร้อนให้กับน้ำหรือของเหลวซึ่งเป็นสารทำงานภายในท่อ มีลักษณะดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 ลักษณะวัสดุสะท้อนแสงโค้งหน้าตัดรูปพาราโบลา

สำหรับการออกแบบโครงสร้างของวัสดุสะท้อนแสงโค้งหน้าตัดรูปพาราโบล่าจะมีชื่อเรียกเฉพาะส่วน ดังแสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 โครงสร้างของหน้าตัดพาราโบล่าที่ใช้ในการออกแบบ

- เมื่อ
- Aperture width คือความกว้างของวัสดุสะท้อนแสงโค้งหน้าตัดรูปพาราโบล่า
  - Parabolic trough length คือความยาวของรางพาราโบลิก
  - Rim angle คือมุมระหว่างแกนของพาราโบล่าและเส้นที่ลากจากจุดโฟกัสมายังส่วนปลายของเส้นพาราโบล่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

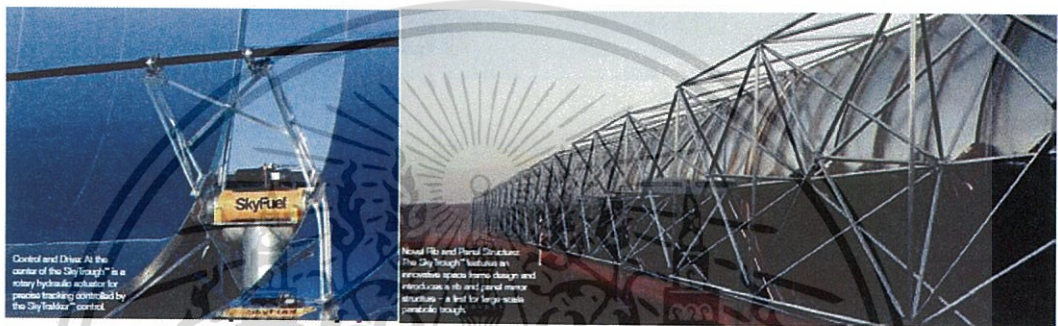
Receiver diameter คือเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อดูดซับรังสี

Focal length คือระยะโฟกัส

Beam spread คือมุมของลำรังสีที่สะท้อนมายังท่อดูดซับ หลังจากลำรังสีกระทบวัสดุสะท้อนแสง

2.3.2 โครงสร้างรับวัสดุสะท้อนแสงโค้ง

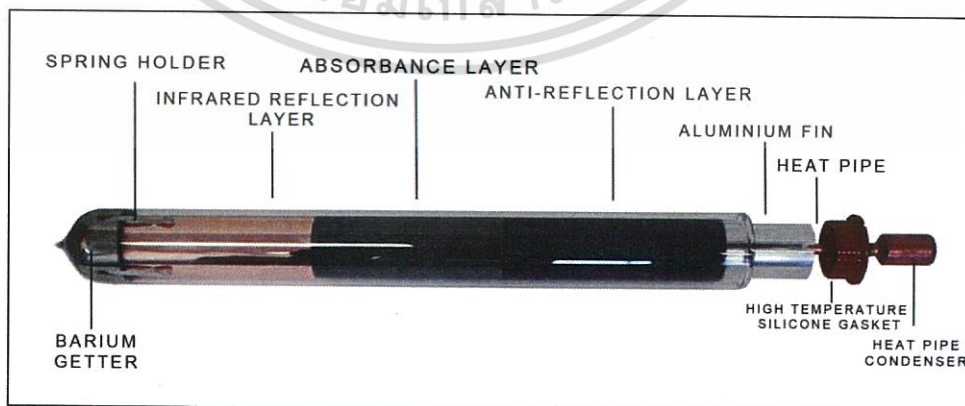
เป็นโครงสร้างที่ออกแบบเพื่อรับน้ำหนัก เพิ่มความแข็งแรงให้กับแผ่นกระจกหรือวัสดุสะท้อนแสงโค้ง และต้องออกแบบให้มีโครงสร้างรับท่อดูดซับ ดังแสดงในรูปที่ 2.16 รูปแบบของโครงสร้างโดยทั่วไปขึ้นรูปกับกระจกโค้ง หรือการออกแบบกำลังการผลิตของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ วัสดุอาจทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม หรืออะลูมิเนียม เพื่อลดน้ำหนักให้โครงสร้าง



รูปที่ 2.16 แสดงโครงสร้างรับวัสดุสะท้อนแสงโค้งและท่อดูดซับ

2.3.3 ท่อดูดซับรังสี

เป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญมากต่อประสิทธิภาพของระบบ ท่อดูดซับรังสีจะทำหน้าที่นำสารทำงานหรือของเหลวไหลผ่านเพื่อรับพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ ที่เกิดจากการรวมแสงของรางพาราโบลิก โดยปกติท่อรับรังสีทำจากท่อโลหะ อาจเป็นท่อทองแดงเคลือบด้วยสารดูดความร้อน โดยทั่วไปท่อโลหะจะบรรจุภายในหลอดแก้ว โดยทำให้ช่องว่างระหว่างท่อโลหะและหลอดแก้วเป็นสุญญากาศ เพื่อลดการสูญเสียความร้อน โดยการพาความร้อน ลักษณะของท่อดูดซับรังสี (Receiver Tube) แสดงในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 แสดงลักษณะ และส่วนประกอบของท่อดูดซับรังสี (Receiver Tube)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.4 สารทำงานในส่วนรวมแสงด้วยรางพาราโบลิก

เป็นของเหลวที่ไหลอยู่ภายในท่อดูดซับรังสี โดยจะรับความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์เข้ามาจากรางรวมแสงแบบพาราโบลิก

เนื่องจากรางพาราโบลิกสามารถรวมแสงอาทิตย์ให้มีอุณหภูมิสูงมาก ประมาณ 400 องศาเซลเซียส ดังนั้น สารทำงานที่เลือกใช้ในระบบท่อดูดซับรังสี (Absorber Tube) ต้องมีจุดเดือดสูงเช่นกัน โดยทั่วไปจะเลือกใช้น้ำมันร้อน (Thermal Oil) เป็นสารทำงาน

## 2.4 วัสดุที่ใช้เป็นวัสดุสะท้อนแสงของรางรวมแสงอาทิตย์แบบพาราโบล

### 2.4.1 สแตนเลส

สแตนเลส หรือชื่ออย่างเป็นทางการคือเหล็กกล้าไร้สนิมเป็น ศัพท์ทั่วไปที่ใช้เรียกเหล็กในกลุ่มที่มีความต้านทานการกัดกร่อนสูง สแตนเลสเป็นโลหะผสมระหว่างเหล็กและคาร์บอน ซึ่งส่วนประกอบจะมีปริมาณคาร์บอนต่ำ มีโครเมียมเป็นส่วนผสมหลักประมาณ 10.5 % หรือมากกว่า ทำให้เกิดการสร้างฟิล์มโครเมียมออกไซด์ (chromium oxide film : CrO<sub>2</sub> หรือเรียกว่า passive film) ที่มองไม่เห็นเกาะติดแน่นอยู่ที่ผิวหน้าทำให้เหล็กกล้ามีความต้านทานการกัดกร่อน ฟิล์มปกป้องกันนี้ จะมีความบางเทียบเท่ากับวาทะ 1 แผ่นบนตึกสูง 20 ชั้น ถ้าฟิล์มที่ผิวหน้านั้นถูกทำลายไม่ว่าจากแรงกล สารเคมี หรือออกซิเจนที่มีอยู่ในบรรยากาศ แม้จำนวนน้อยนิดจะเข้าทำปฏิกิริยากับโครเมียม สร้างฟิล์มโครเมียมออกไซด์ทดแทนชั้นใหม่ด้วยตัวมันเอง แต่การทำให้สแตนเลสเป็นสนิมคือการที่ถูกทำลายฟิล์มโครเมียมออกไซด์ที่เคลือบผิวออกไปในสถานะที่สแตนเลสสามารถเกิดสนิมได้ ก่อนที่ฟิล์มโครเมียมออกไซด์จะก่อตัวขึ้นมาอีกครั้ง เช่น ถ้าสแตนเลสถูกทำให้เกิดรอยขีดข่วน แล้วบริเวณรายนั้นมีความชื้น ซึ่งสามารถทำให้เกิดปฏิกิริยากับธาตุเหล็กก่อนที่ฟิล์มโครเมียมออกไซด์จะก่อตัวขึ้นมา ก็จะเป็นสาเหตุให้เกิดสนิมขึ้นได้

สแตนเลสสามารถปรับปรุงคุณสมบัติในการต้านทานการกัดกร่อนและสมบัติอื่นๆที่ต้องการให้สูงขึ้นได้โดยการเพิ่ม ส่วนผสมของโครเมียมและเพิ่มธาตุอื่นๆ เช่น โมลิบดีนัม นิกเกิลและไนโตรเจนเข้าไป สแตนเลสมีอยู่มากกว่า 60 ชนิด

ด้วยคุณสมบัติที่ไม่เหมือนใคร เช่น ยากต่อการขึ้นสนิมเมื่อเทียบกับโลหะหรือวัสดุชนิดอื่นๆ ค่าบำรุงรักษาต่ำ ง่ายต่อการเชื่อมและการขึ้นรูป ระยะเวลาการใช้งานคุ้มค้ำก็ราคา และสามารถนำกลับมาใช้ได้ใหม่ทั้งหมด จึงทำให้สแตนเลส เป็นโลหะที่ทรงคุณค่า คุณสมบัติและประโยชน์ใช้สอยที่ไร้ขีดจำกัด

#### ประเภทของสแตนเลส

โดยทั่วไปสแตนเลสแบ่งออกเป็น 5 กลุ่มใหญ่ตามโครงสร้างคือ ออสเทนนิติก, เฟอริติก, ดูเพล็กซ์, มาร์เทนซิติก และกลุ่มเพิ่มความแข็งแรงโดยวิธีการตกผลึก

1.) กลุ่มออสเทนนิติก (Austenitic) หรือสแตนเลสตระกูล 300 เป็นเกรดที่ใช้งานแพร่หลายมากที่สุด ถึง 70% มีคุณสมบัติที่แม่เหล็กดูดไม่ติด (non - magnetic) มีส่วนผสมของโครเมียม 16% คาร์บอน อย่างมากที่สุด 0.15% มีส่วนผสมของธาตุนิกเกิล 8% เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติในการขึ้นรูปประกอบ (Fabrication) และเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อน บางเกรดจะมีแมงกานีสผสมอยู่ด้วยเกรดที่รู้จักกันอย่างแพร่หลายและนิยมเรียก 18/8 คือการที่มีส่วนผสมของโครเมียม 18% และนิกเกิล 8%

2.) กลุ่มเฟอริติก (Ferritic) มีสมบัติแม่เหล็กดูดติด (magnetic) มีธาตุคาร์บอนผสมปริมาณที่ต่ำ และมีโครเมียมเป็นธาตุผสมหลักที่สำคัญอาจอยู่ระหว่าง 10.5%-27% บางเกรดผสมนิกเกิลลงไปเล็กน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บางเกรดผสมโมลิบดีนัม หรืออลูมิเนียม ไททาเนียม

3.) กลุ่มมาร์เทนซิติก (Martensitic) มีสมบัติแม่เหล็กดูดติด (magnetic) เป็นตระกูลที่มีความต้านทานการกัดกร่อนน้อยกว่าอสเทนนิติกและเฟอร์ริติก แต่มีความทนทานและแข็งแรงมากกว่า โดยทั่วไปจะมีส่วนผสมของโครเมียม 12 –14% โมลิบดีนัม 0.2-1% มีนิกเกิล 0-2% และมีคาร์บอนผสมอยู่ประมาณ 0.1-1% สเตนเลสตระกูลนี้สามารถปรับความแข็งได้โดยการให้ความร้อนแล้วทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว (Quenching) และอบคืนตัว (Tempering) สามารถลดความแข็งได้ คล้ายกับเหล็กกล้าคาร์บอน และพบการใช้งานที่สำคัญในการผลิตเครื่องตัด อุตสาหกรรมเครื่องบินและงานวิศวกรรมทั่วไป

4.) กลุ่มดูเพล็กซ์ (Duplex) มีโครงสร้างผสมระหว่างโครงสร้างเฟอร์ริติกและอสเทนนิติก จึงทำให้มีความแข็งแรงมากกว่าอสเทนนิติกและมีความทนทานต่อการกัดกร่อนชนิดรูเข็ม ซอกอับ มีโครเมียมเป็นธาตุผสมอยู่ระหว่าง 19-28% และโมลิบดีนัมสูงกว่า 5% และมีนิกเกิลน้อยกว่าตระกูลอสเทนนิติก พบว่าใช้งานมากในสภาพแวดล้อมที่มีคลอไรด์สูง

5.) กลุ่มเพิ่มความแข็งโดยการตกผลึก (Precipitation hardening) มีความต้านทานการกัดกร่อนเทียบเคียงกับตระกูลอสเทนนิติก มีความแข็งแรงมากกว่าตระกูลมาร์เทนซิติก เกรดที่เป็นที่รู้จักในตระกูลนี้ คือ 17-4H ซึ่งมีส่วนผสมของโครเมียม 17% และนิกเกิล 4% สามารถเพิ่มความแข็งแรงได้โดยกลไกเพิ่มความแข็งจากการตกผลึก (Precipitation hardening mechanism) โดยสามารถเพิ่มความแข็งแรงสูงมาก มีค่าความเค้นพิสูจน์ (Proof stress) อยู่ระหว่าง 1,000 ถึง 1,500 MPa ขึ้นอยู่กับชนิดและกรรมวิธีปรับปรุงคุณสมบัติด้วยความร้อน (Heat treatment) สเตนเลสชนิดนี้สามารถชุบแข็งได้ในคราวเดียว จึงเหมาะสำหรับทำแกน ปืนหัววาล์ว และส่วนประกอบของ อากาศยาน

ผิวของสเตนเลส

No.1 เป็นผิวแรกที่ผ่านกระบวนการรีดร้อน รีดเย็น อบอ่อน หรือปรับปรุงด้วยความร้อน ไม่ได้ขจัดคราบออกไซด์ออก ผิวมีสีเทา ค่อนข้างหยาบ โดยทั่วไปจะใช้งานที่ทนความร้อน

2D เป็นลักษณะผิวด้านไม่เงา มีความสะท้อนแสง 13% ผิวผ่านกระบวนการรีดเย็น ตามด้วยการอบอ่อนและขจัดคราบออกไซด์

2B เป็นผิว 2D ที่ผ่านลูกรีดขนาดใหญ่กดทับเพื่อปรับความเรียบ เพิ่มความเงา ผิวเงาสะท้อนปานกลาง ผลิตโดยวิธีการรีดเย็น ตามด้วยการอบอ่อน ขจัดคราบออกไซด์ และนำไปรีดปรับความเรียบผิว (Skin pass rolling) ลักษณะของผิวจะเงาขึ้นเล็กน้อยจากผิว 2D มีความสะท้อนแสง 22% ในประเภทอสเทนนิติก (304,316) และ 46% ในประเภทเฟอร์ริติก (410,430)

No.3 มีลักษณะเป็นผิวที่ขัดด้วยวัสดุเบอร์ 100-120

No.4 เป็นผิวที่ขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 150-180 ลักษณะผิวเป็นลายเส้นสั้นคล้ายขนแมว HL หรือ Hair line มีลักษณะการขัดอย่างละเอียดด้วยกระดาษทรายให้มีรอยขีดเป็นเส้นยาวต่อเนื่องคล้ายเส้นผม

No.5 มีลักษณะเป็นผิว No. 4 ที่นำมาผ่านเครื่องปรับผิว (Skin pass rolling) เพื่อให้ผิวมีความเรียบมากขึ้น

No.6 มีลักษณะเป็นผิวที่ขัดด้วยวัสดุเบอร์ 200-300

No.7 มีลักษณะเป็นผิวขัดด้วยวัสดุประเภทผ้าสักหลาด (Buffing) มีความมันเงาประกอบกับลายเส้นบางๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

BA เป็นสแตนเลสที่ผ่านกระบวนการ Zenzimir Mill คือรีดเย็นโดยความหนาลดลงทีละน้อยๆ ผ่านการอบอ่อนด้วยก๊าซไฮโดรเจน เพื่อป้องกันการออกซิเดชันกับออกซิเจนในอากาศ ผิวมันเงา สะท้อนแสงได้ดี ผิวผลิตภัณฑ์สแตนเลสที่กระทำด้วยวิธีนี้จะมียี่ห้อ BA หรือ NO.2BA , A ซึ่งผิวอบอ่อนเงาจะมีลักษณะเป็นเงากระจก โดยเริ่มต้นจากการรีดเย็นอบอ่อนในเตาควบคุมบรรยากาศ ผิวเงาที่เห็นจะเป็นการขัดผิวด้วยลูกกลิ้งขัดผิว หรือเจียรระโนผิวตามเกรดที่ต้องการ ผิวอบอ่อนเงาสีส่วนมากจะใช้กับงานสถาปัตยกรรมที่ต้องการผิวสะท้อน ผิวอบอ่อนสีน้ำนมจะไม่สะท้อนแสงเหมือนกับ No.8 จะใช้งานที่เป็นขอบชิ้นส่วนทางสถาปัตยกรรม ภาชนะในครัว อุปกรณ์ในกระบวนการผลิตอาหาร

No.8 หรือเรียกว่า Mirror เป็นสภาพผิว 2B, BA ที่ผิวจะถูกขัดด้วยเครื่องขัดละเอียด ขัดด้วยวัสดุประเภทสำลีหรือผ้าสักหลาดจนมองไม่เห็นลายเส้นใดๆ ลักษณะผิวมีความเงาเหมือนกระจกนำไปใช้กับงานตกแต่งทางด้านสถาปัตยกรรม และงาน ที่เน้นความสวยงาม

## 2.5 ประสิทธิภาพของระบบรวมแสงอาทิตย์แบบพาราโบลา

ประสิทธิภาพของระบบรวมแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาสามารถหาได้ตามมาตรฐานของ ASHRAE Standard 93-77 ซึ่งเมื่อพิจารณาช่วงระยะเวลาสั้นๆ สามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพทางความร้อน ณ ขณะใดขณะหนึ่ง (Instantaneous efficiency,  $\eta$ ) ของตัวรับรังสีอาทิตย์ชนิดรวมแสง ได้ดังสมการดังนี้

$$\eta = \frac{m C_p (T_o - T_i)}{I_T A_c} \quad (2.5)$$

## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Mohammed S. และคณะ ได้ทำการประดิษฐ์เตาพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาที่มีระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบสองแกนที่ประเทศจอร์แดน โดยมีการควบคุมโดยระบบตรรกะที่ใช้ในการควบคุมระบบการเคลื่อนไหวยของเตาแสงอาทิตย์ ผลจากการทดสอบอย่างต่อเนื่องเป็นเวลาสามวัน ในช่วงเวลา 8.30 - 16.30 ในปี 2008 ขณะนั้นอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมในฤดูร้อนมีค่าประมาณ 33°C พบว่า อุณหภูมิของน้ำ ภายในท่อสูงขึ้นจากประมาณ 36°C เป็นประมาณ 90°C และยังพบว่าอุณหภูมิของน้ำสูงขึ้นเมื่อความเข้มข้นของพลังงานแสงอาทิตย์มากขึ้น

Avadhesh Yadav, Manoj Kumar และ Balram ได้ทำการศึกษาและทดลองระบบทำความร้อนอากาศพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้รวมแสงอาทิตย์แบบพาราโบลา โดยรังสีแสงอาทิตย์จะสะท้อนไปยังท่อดูดกลืนรังสีที่เป็นตำแหน่งของระยะโฟกัสของรางพาราโบลา และใช้อากาศเป็นของไหลทำงานที่รวบรวมความร้อนจากท่อดูดกลืนรังสี และเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของรางพาราโบลาจึงใช้วัสดุสะท้อนแสงที่แตกต่างกัน พบว่าแผ่นอลูมิเนียมมีอุณหภูมิสูงสุดเป็น 52.3°C ซึ่งมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 24.22% เมื่อเทียบกับการใช้แผ่นเหล็กเป็นวัสดุสะท้อนแสง และเพิ่มขึ้น 8.5% เมื่อเทียบกับการใช้ฟอยล์อลูมิเนียมเป็นวัสดุสะท้อนแสง และเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างใช้แผ่นอลูมิเนียมแสงกับใช้แผ่นเหล็กเป็นเป็นวัสดุสะท้อนพบว่าประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น 61.8% และประสิทธิภาพเมื่อใช้แผ่นอลูมิเนียมสะท้อนแสงเทียบกับฟอยล์อลูมิเนียมเป็นวัสดุสะท้อนแสงจะเพิ่มขึ้น 18.98%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

# วิธีการดำเนินงานวิจัย

โครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาระบบรางวัลแสงพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลา เพื่อศึกษา ออกแบบ และประดิษฐ์รางวัลแสงแบบพาราโบลิก สำหรับใช้ในห้องปฏิบัติการ โดยมีวิธีการดำเนินการศึกษาดังต่อไปนี้

### 3.1 วัสดุและอุปกรณ์

#### 3.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน

##### 3.2.1 การคำนวณหาความโค้งของรางวัลพาราโบลิก

##### 3.2.2 การออกแบบและการสร้าง

##### 3.2.3 การทดสอบหาประสิทธิภาพของระบบรางวัลแสงอาทิตย์แบบพาราโบลิก

### 3.1 วัสดุและอุปกรณ์

อุปกรณ์ที่ใช้ในการออกแบบระบบรางวัลแสงอาทิตย์แบบพาราโบลิก มีส่วนประกอบหลัก ดังนี้คือ

- 1.) แผ่นไม้
- 2.) สีทาไม้ สำหรับทาทภายนอก
- 3.) อลูมิเนียมฉาก ขนาด  $2.54 \times 2.54 \times 0.3$  เซนติเมตร
- 4.) อลูมิเนียมเส้น
- 5.) แผ่นสแตนเลส ผิวกระจก No.8 ความหนา 0.8 และ 0.5 เซนติเมตร
- 6.) ลูกปัด
- 7.) ฝาท่อ PVC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว
- 8.) ท่อ PVC และข้อต่อ
- 9.) ท่อแก้วสุญญากาศ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 58 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 48 มิลลิเมตร และความยาวท่อ 180 เซนติเมตร
- 10.) ท่อทองแดง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3/8 นิ้ว
- 11.) สายยางทนความร้อน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3/8 นิ้ว
- 12.) ฉนวนกันความร้อน
- 13.) ข้อต่อทองเหลือง
- 14.) ซิลิโคน
- 15.) จาระบี
- 16.) เหล็กฉาก
- 17.) นี้อต
- 18.) เลื่อยฉลุไฟฟ้า
- 19.) สว่าน
- 20.) เครื่องตัดเหล็ก
- 21.) เครื่องเจียร (ลูกหมู)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

22.) โฮลซอร์ (hole saw)

23.) แคลมป์ (C-clamp)

24.) ไชควง

25.) ปะแจ

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบหาประสิทธิภาพของระบบรวมแสงอาทิตย์แบบพาราโบลิก

1.) ไพรานอมิเตอร์

2.) เทอร์โมคัปเปิลแบบ K

3.) บีกเกอร์

### 3.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน

3.2.1 การคำนวณหาความโค้งของรางพาราโบลิก

การคำนวณหาความโค้งของรางพาราโบลิก สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.4)

$$y = \frac{x^2}{4f}$$

โดยกำหนดให้  $f$  คือระยะโฟกัส = 10 เซนติเมตร

$y$  คือความกว้างของรางพาราโบลิก = 60 เซนติเมตร

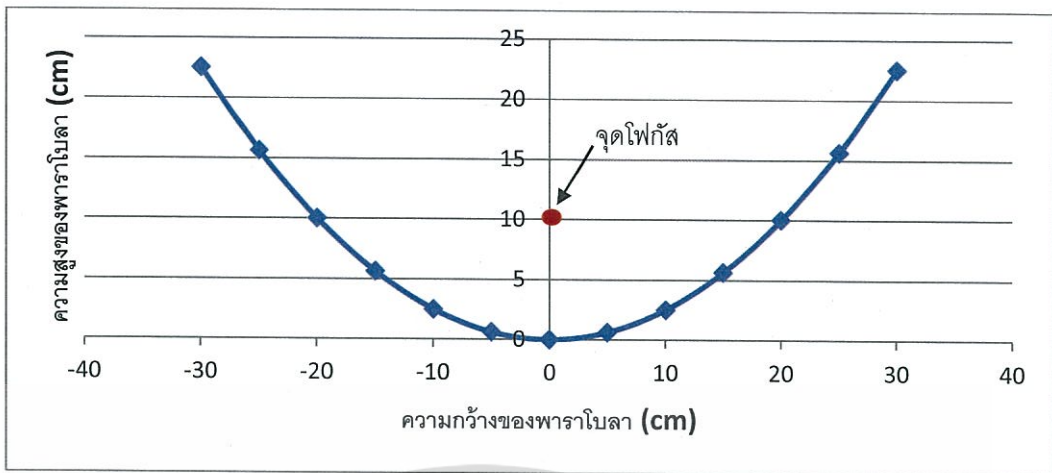
ดังนั้น  $x = 30$  เซนติเมตร

ตารางที่ 3.1 แสดงระยะแกน  $y$  ที่สัมพันธ์กับความกว้างของรางพาราโบลิก

| ระยะแกน $x$ (เซนติเมตร) | ระยะแกน $y$ (เซนติเมตร) |
|-------------------------|-------------------------|
| -30                     | 22.500                  |
| -25                     | 15.625                  |
| -20                     | 10.000                  |
| -15                     | 5.625                   |
| -10                     | 2.500                   |
| -5                      | 0.625                   |
| 0                       | 0.000                   |
| 5                       | 0.625                   |
| 10                      | 2.500                   |
| 15                      | 5.625                   |
| 20                      | 10.000                  |
| 25                      | 15.625                  |
| 30                      | 22.500                  |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



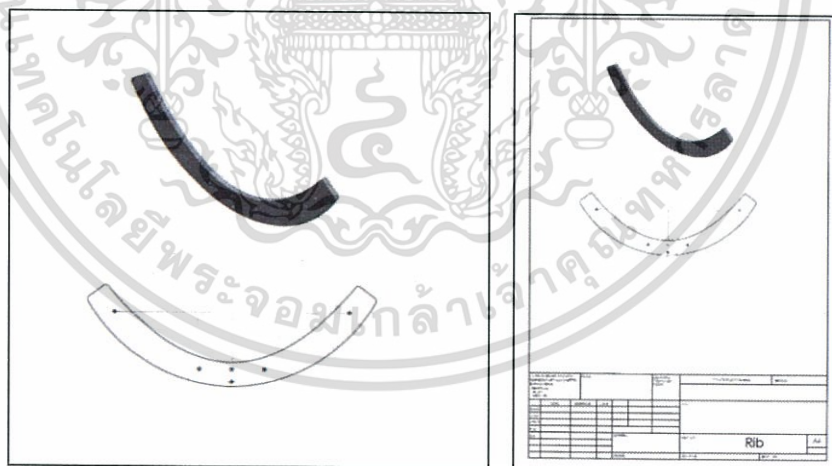
รูป 3.1 แสดงลักษณะของรางพาราโบลาที่ได้จากการคำนวณ

### 3.2.2 การออกแบบและการสร้าง

โครงการพิเศษนี้ใช้โปรแกรม Solid work ในการออกแบบส่วนประกอบสำคัญต่างๆ และออกแบบการประกอบของรางพาราโบลา ดังนี้

#### 3.2.2.1 การออกแบบส่วนประกอบสำคัญ แบ่งเป็น 3 ส่วนสำคัญ คือ

1.) ส่วน Rib เป็นส่วนของโครงรับน้ำหนักที่มีลักษณะโค้ง โดยรางพาราโบลา 1 ราง ประกอบด้วยส่วน Rib ทั้งหมด 5 ชั้น แต่ละชั้นมีระยะห่างกัน 30 เซนติเมตร



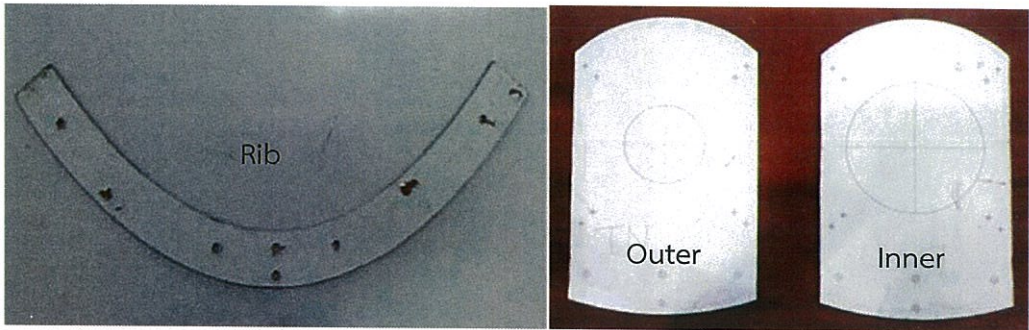
รูปที่ 3.2 การออกแบบโครงสร้างของ Rib ที่คำนวณความยาวโฟกัสเรียบร้อยแล้ว

#### 2.) ส่วน Inner ball bearing

เป็นส่วนของยึดรางพาราโบลาเข้ากับลูกปืน มีช่องขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 128 มิลลิเมตร พอดีกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลูกปืน โดยรางรวมแสงแบบพาราโบลา 1 รางจะมีส่วน Inner ball bearing 2 ชั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





รูปที่ 3.5 โครงสร้างต้นแบบส่วน Rib ,Outer ball bearing และ Inner ball bearing

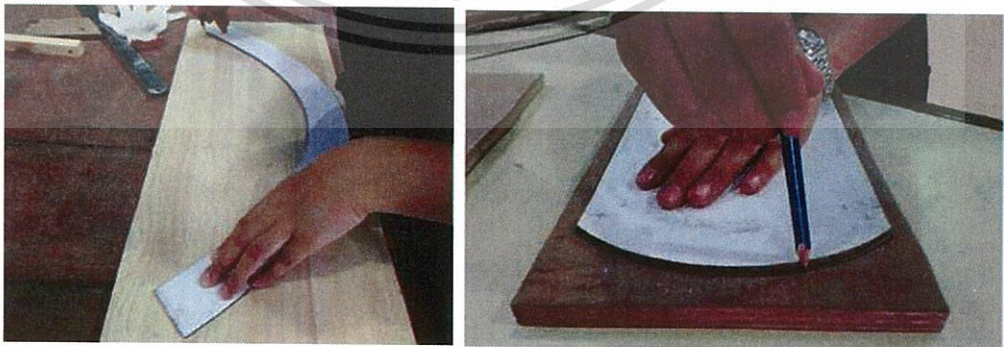
3.2.2.3 ขั้นตอนการตัดส่วนประกอบต่างๆ โดยทาบไม้จริงกับต้นแบบ มีวิธีในการประกอบดังนี้ คือ

1.) การแบ่งไม้ตามขนาดแต่ละชิ้นส่วน โดยใช้เลื่อยวงเดือนตัดออกให้เป็นส่วนๆ



รูปที่ 3.6 แสดงขั้นตอนการแบ่งไม้ตามขนาดแต่ละชิ้นส่วน

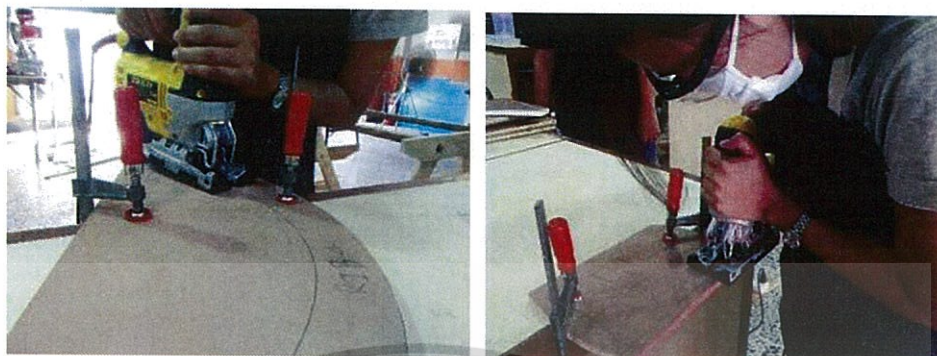
2.) ทาบแบบไม้ที่ตัดได้กับไม้จริงที่จะใช้ทำเป็นชิ้นส่วนรางพาราโบลิกจริงเป็นส่วน Rib, Inner ball bearing และ Outer ball bearing



รูปที่ 3.7 แสดงขั้นตอนการทาบแบบไม้กับไม้จริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.) ตัดชิ้นส่วนตามแบบที่ได้เตรียมไว้ โดยใช้เลื่อยฉลุ



รูปที่ 3.8 แสดงการตัดชิ้นไม้

4.) เจาะรูตามแบบเพื่อใช้ยึดน็อตและใช้โกลชอเจาะไม้ในส่วน Inner ball และส่วนOuter ball bearing



(ก)

(ข)

รูปที่ 3.9 (ก) การเจาะรูไม้เพื่อใช้สำหรับยึดน็อต

(ข) การเจาะวงกลมในส่วน Inner ball และส่วนOuter ball bearing

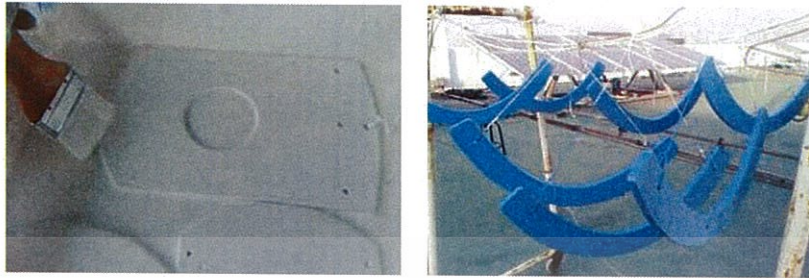
5.) นำไม้ที่ตัดและเจาะรูเรียบร้อยแล้วไปขัดไม้ด้วยเครื่องขัดกระดาษทราย



รูปที่ 3.10 แสดงการขัดไม้ด้วยเครื่องขัดกระดาษทราย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.) เป็นขั้นตอนของการนำไม้ที่ขัดกระดาษทรายแล้วไปทาสีและตากแดดให้แห้งเพื่อเพิ่มอายุการใช้งาน เพื่อป้องกันน้ำฝนและแสงแดด



(ก)

(ข)

รูปที่ 3.11 (ก) การทาสีไม้ (ข) ไม้ที่ผ่านการทาสีแล้วนำไปตากแห้ง

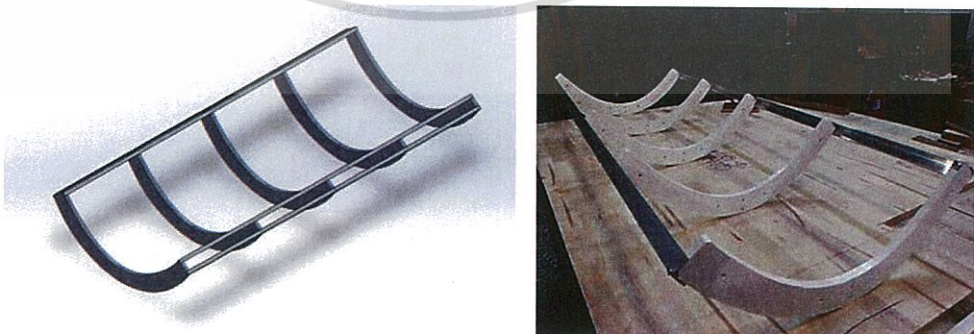
3.2.2.4 การประกอบรางพาราโบลาโบลิก มีวิธีการประกอบแต่ละส่วนดังนี้ คือ

1.) นำส่วน Rib มาเรียงกันทั้งหมด 5 ชิ้น โดยที่มีความยาวราว 150 เซนติเมตร และเว้นระยะห่างแต่ละอันเท่าๆ กัน จากนั้นทำการตีโครงโดยใช้ลู่มีเนียมฉากยึดประกบทั้งด้านบน และด้านล่าง



รูปที่ 3.12 ลักษณะการเรียงส่วน Rib เพื่อเตรียมประกอบ

2.) ใช้ลู่มีเนียมฉากประกอบ Rib ทุกอันเข้าด้วยกันที่มุมทั้ง 4 มุม ให้มีลักษณะเป็นราง



(ก.)

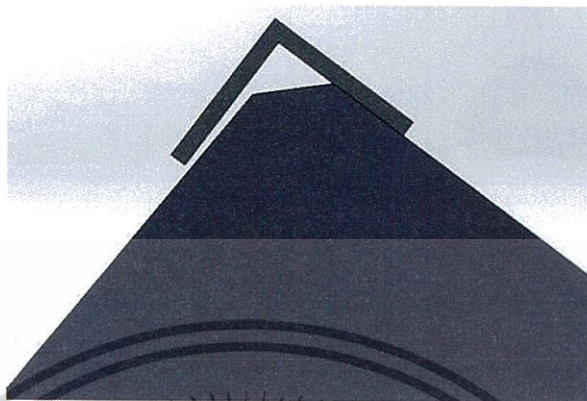
(ข.)

รูปที่ 3.13 (ก.) การประกอบโครงสร้างของรางพาราโบลาโบลิกด้วยโปรแกรม Solid work

(ข.) การประกอบโครงสร้างของรางพาราโบลิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.) เจาะรูเพื่อยึดน็อตระหว่างอลูมิเนียมฉาก กับ Rib และก็เปิดช่องไว้เล็กน้อยเพื่อสอดแผ่นสะท้อนแสงเข้าไป

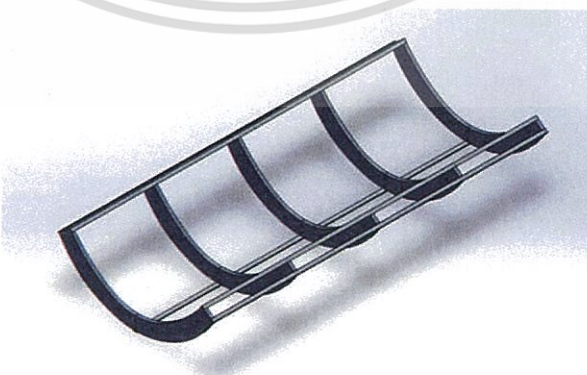


รูปที่ 3.14 ลักษณะอลูมิเนียมฉากประกบกับมุมของรางพาราโบลาโกลิกด้วยโปรแกรม Solid work



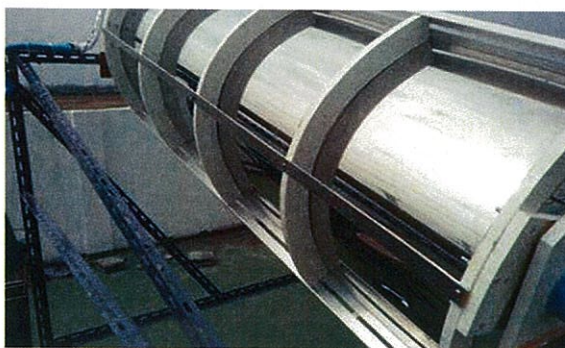
รูปที่ 3.15 การยึดอลูมิเนียมฉากกับมุมของรางพาราโกลิก

4.) ใช้อลูมิเนียมเส้น ที่มีลักษณะแบนยาวยึดด้านล่างของรางพาราโกลิกอีกครั้ง เพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับราง



รูปที่ 3.16 การยึดอลูมิเนียมเส้นที่ด้านล่างของรางพาราโกลิกด้วยโปรแกรม Solid work

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.17 อลูมิเนียมเส้นที่ยึดด้านล่างของรางพาราโบลา

5.) สอดแผ่นสะท้อนแสงเข้ากับโครงของรางพาราโบลา ให้มีลักษณะโค้งแนบไปกับโครงสร้างของราง



รูปที่ 3.18 สอดแผ่นสะท้อนแสงกับโครงสร้างรางพาราโบลาด้วยโปรแกรม Solid work

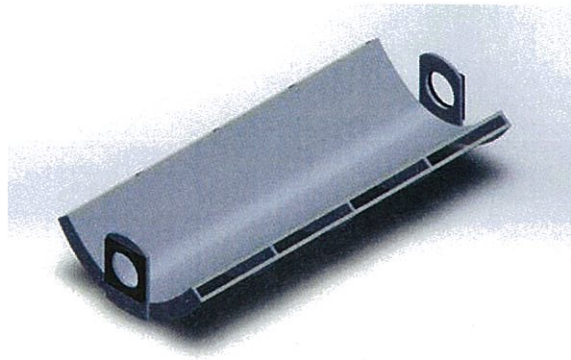
6.) ติดส่วน Inner ball bearing เข้ากับโครงที่ด้านหน้าตัดพาราโบลาทั้งสองด้าน



รูปที่ 3.19 ติดส่วน Inner ball bearing เข้ากับโครงสร้างด้วยโปรแกรม Solid work

7.) ติดลูกปืนประกบกับส่วน Inner ball bearing ทั้งสองด้าน ซึ่งจะทำให้รางพาราโบลาหมุนเคลื่อนที่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.20 ติดลูกปืนกับส่วน Inner ball bearing ทั้งสองด้านด้วยโปรแกรม Solid work

8.) ประกอบส่วน Outer ball bearing เข้ากับลูกปืนอีกด้าน และติดฝาท่อ PVC สั้นๆที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกท่อพอดีกับเส้นผ่านศูนย์กลางวงกลมที่ส่วน Outer ball bearing ทั้งสองด้าน ฝาท่อ PVC จะช่วยรองรับท่อแก้วสุญญากาศ ไม่ให้เคลื่อนที่ในขณะที่รางพาราโบลาหมุน



(ก.)

(ข.)

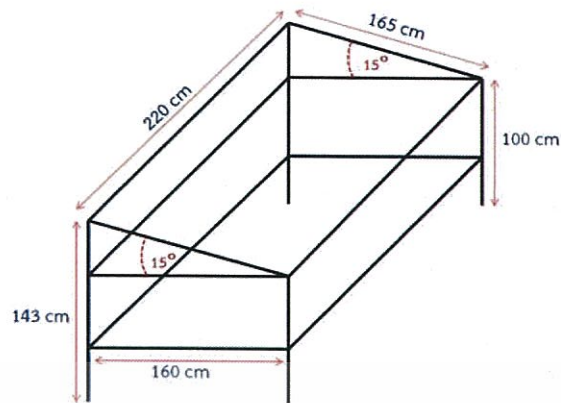
รูปที่ 3.21 (ก.) รางพาราโบลาที่ประกอบ Rib, Inner ball bearing และ Outer ball bearing สมบูรณ์ด้วยโปรแกรม Solid work

(ข.) รางพาราโบลาที่ประกอบ Rib, Inner ball bearing และ Outer ball bearing สมบูรณ์

3.2.2.5 สร้างโครงรับน้ำหนักรางพาราโบลา

1.) ออกแบบโครงสำหรับติดตั้งรางพาราโบลาและประกอบโครงเหล็กฉาก โดยกำหนดให้ โครงสร้างรับน้ำหนักมีขนาดความกว้างเท่ากับ 160 เซนติเมตร ความยาวเท่ากับ 220 เซนติเมตร มีส่วนสูงขาตั้งด้านหลังเท่ากับ 143 เซนติเมตร มีส่วนสูงขาตั้งด้านหน้าเท่ากับ 100 เซนติเมตร และ โครงสร้างรับน้ำหนักทำมุมเอียง 15 องศา

2.) สำหรับการติดตั้งจะใช้หลักการติดตั้งเช่นเดียวกับการติดตั้งแผงโซล่าเซลล์ คือจะให้ โครงสร้างรับน้ำหนักหันหน้าไปทางทิศใต้เสมอ



รูปที่ 3.22 แสดงขนาดโครงสร้างรับน้ำหน้ารางพาราโบลา

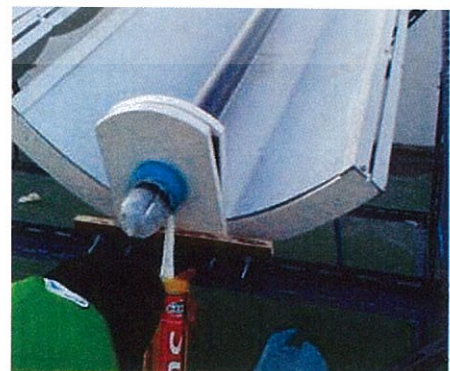
### 3.2.2.6 การติดตั้งรางพาราโบลา

- 1.) ออกแบบโครงสร้างสำหรับติดตั้งรางพาราโบลา และประกอบโครงด้วยเหล็กฉาก
- 2.) ติดตั้งรางพาราโบลาทั้ง 3 รางเข้ากับโครงเหล็กฉาก



รูปที่ 3.23 ติดตั้งรางพาราโบลา

- 3.) ติดตั้งท่อแก้วสุญญากาศที่ประกอบเรียบร้อยแล้วเข้ากับรางพาราโบลาแต่ละราง และใช้ซิลิโคนยาวแนวไว้ เพื่อไม่ให้ท่อหลุดออกจากรางพาราโบลาได้

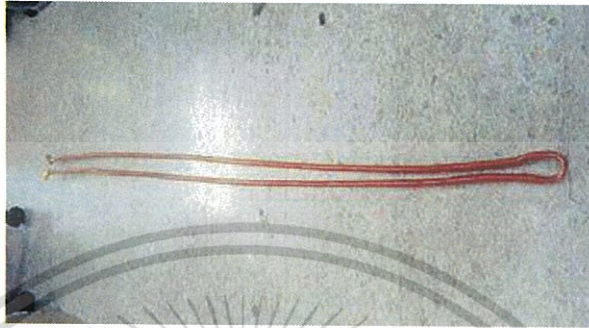


รูปที่ 3.23 ติดตั้งท่อแก้วสุญญากาศเข้ากับรางพาราโบลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2.7 การประกอบท่อทองแดงในท่อแก้วสุญญากาศ มีวิธีการประกอบแต่ละส่วนดังนี้  
คือ

1.) ตัดท่อทองแดงความยาวเส้นละ 340 เซนติเมตร แล้วตัดให้เป็นรูปตัว U และต่อปลายแต่ละด้านด้วยข้อต่อฉากทองเหลืองเพื่อต่อกับสายยางทนความร้อน



รูปที่ 3.24 ท่อทองแดงที่ตัดเป็นรูปตัว U แล้ว



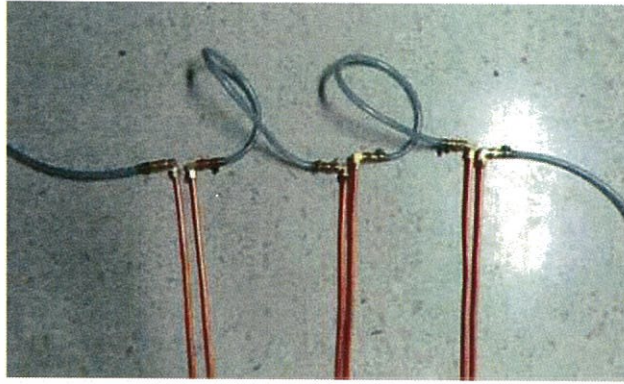
รูปที่ 3.25 ต่อข้อต่อฉากทองเหลืองเข้ากับปลายท่อทองแดงแต่ละด้าน

2.) ต่อข้อต่อตรงทองเหลืองเข้ากับปลายสายยางทนความร้อนแต่ละด้าน เพื่อใช้ต่ออนุกรมท่อทองแดงทั้ง 3 ท่อเข้าด้วยกัน



รูปที่ 3.26 ต่อข้อต่อตรงทองเหลืองเข้ากับปลายสายยางทนความร้อนแต่ละด้าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.27 ต่อบนุกรมท่อทองแดงทั้ง 3 ท่อเข้าด้วยกัน

3.) หุ้มฉนวนกันความร้อนตามสายอย่างกันความร้อน ข้อต่อต่างๆ เพื่อลดการสูญเสียความร้อนระหว่างทำการเก็บผลการทดลอง

4.) นำท่อทองแดงสวมเข้ากับท่อแก้วสุญญากาศ และปิดปากท่อแก้วสุญญากาศด้วยการอัดซิลิโคน เพื่อลดการสูญเสียความร้อนออกไปจากท่อ



รูปที่ 3.28 ปิดปากท่อแก้วสุญญากาศด้วยการอัดซิลิโคน

3.) เดินระบบท่อน้ำเข้า และท่อน้ำออก เพื่อใช้บันทึกผลการทดลอง



รูปที่ 3.29 เดินระบบท่อน้ำเข้า และท่อน้ำออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.30 รางรวมแสงแบบพาราโบลิกสมบูรณ์

### 3.2.3 การทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพทางความร้อนของระบบรางรวมแสงอาทิตย์แบบพาราโบลิก

การทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพทางความร้อนของรางรวมแสงแบบพาราโบลิกตามมาตรฐาน ASHRAE 93-77 ได้แบ่งการทดลองเป็น 2 ตอน ได้แก่ การทดลองเพื่อหาอัตราการไหลเชิงมวลของน้ำที่ไหลภายในท่อของระบบ และการทดลองเพื่อวัดอุณหภูมิน้ำขาเข้าระบบ อุณหภูมิน้ำขาออกจากระบบ รวมถึงความเข้มรังสีอาทิตย์รวม สำหรับใช้ในการคำนวณหาประสิทธิภาพทางความร้อน

#### 3.2.3.1 หาอัตราการไหลเชิงมวลของน้ำที่ไหลภายในท่อของระบบ

##### วิธีการทดลอง

1. เปิดน้ำที่ทางน้ำออกของระบบใส่ในบีกเกอร์แล้วจับเวลา
2. เมื่อน้ำในบีกเกอร์มีปริมาณเป็น 2000 ml (เท่ากับ 2 kg) จึงหยุดเวลา
3. บันทึกเวลาเป็นวินาที และทำการทดลองทั้งหมด 10 ครั้ง
4. คำนวณหาอัตราการไหลเชิงมวลจากสมการที่ (3.1) ในทุกครั้งของการทดลอง และหาอัตราการไหลเชิงมวลเฉลี่ย

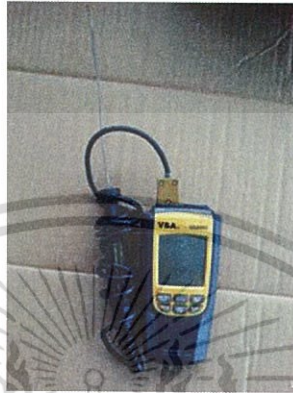
$$\text{อัตราการไหลเชิงมวล} = \frac{\text{มวลของน้ำ (kg)}}{\text{เวลา (s)}} \quad (3.1)$$

### 3.2.3.2 วัดอุณหภูมิน้ำขาเข้าระบบ อุณหภูมิน้ำขาออกจากระบบ และความเข้มรังสีอาทิตย์

รวม

อุปกรณ์การทดลอง

1. เทอร์โมคัปเปิล ชนิดเค และเทอร์โมมิเตอร์ สำหรับใช้วัดอุณหภูมิ



รูปที่ 3.31 แสดงเทอร์โมคัปเปิล ชนิดเค และเทอร์โมมิเตอร์ VA8060

2. ไพรานอมิเตอร์ สำหรับใช้วัดความเข้มรังสีอาทิตย์รวม ( $I_T$ )



รูปที่ 3.32 ไพรานอมิเตอร์

วิธีการทดลอง

1. ติดตั้งไพรานอมิเตอร์บนรางพาราโบลา เพื่อวัดค่าความเข้มรังสีอาทิตย์รวม ( $I_T$ )
2. เปิดน้ำเข้าสู่ระบบจากนั้นทำการวัดอุณหภูมิน้ำเข้า ( $T_{in}$ )
3. หลังจากเปิดน้ำเข้าระบบ ทั้งให้น้ำค้างอยู่ในท่อเป็นเวลา 10 นาที
4. เมื่อครบ 10 นาที จึงเปิดน้ำออกจากระบบ โดยปล่อยน้ำทิ้งเป็นเวลา 1 นาทีก่อน จึงวัดอุณหภูมิน้ำขาออก ( $T_{out}$ )
5. ทำการทดลองข้อ 1- 4 ทุกๆ 10 นาที ตั้งแต่เวลา 09:00 น.-16.00 น.
6. นำค่าที่ได้ไปคำนวณหาประสิทธิภาพทางความร้อนของระบบรวมแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาตามสมการที่ (2.5)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

การทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพทางความร้อนของรางรวมแสงแบบพาราโบลิตตามมาตรฐาน ASHRAE 93-77 ได้แบ่งการทดลองเป็น 2 ตอน ได้แก่ การทดลองเพื่อหาอัตราการไหลเชิงมวลของน้ำที่ไหลภายในท่อของระบบ และการทดลองเพื่อวัดอุณหภูมิน้ำขาเข้าระบบ อุณหภูมิน้ำขาออกจากระบบ รวมถึงความเข้มรังสีอาทิตย์รวม สำหรับใช้ในการคำนวณหาประสิทธิภาพทางความร้อน

#### 4.1 หาอัตราการไหลเชิงมวลของน้ำที่ไหลภายในท่อของระบบ

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการทดลองเป็นเวลาในหน่วยวินาที และอัตราการไหลเชิงมวลของน้ำที่ได้จากการคำนวณ

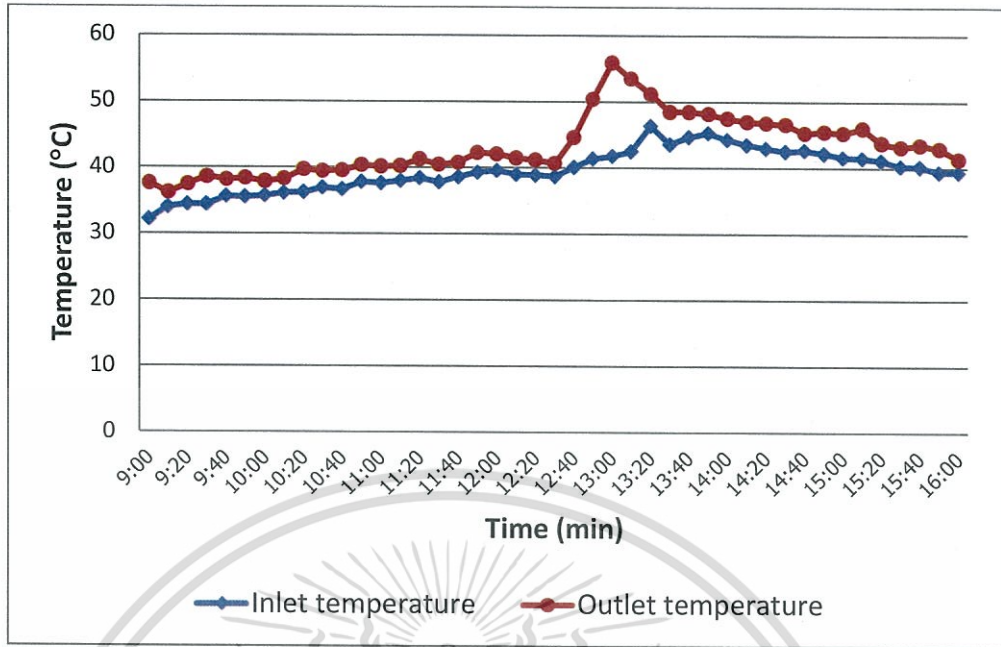
| ครั้งที่ | เวลา (s) | อัตราการไหลเชิงมวล (kg/s) |
|----------|----------|---------------------------|
| 1        | 75       | 0.0267                    |
| 2        | 75       | 0.0267                    |
| 3        | 75       | 0.0267                    |
| 4        | 75       | 0.0267                    |
| 5        | 76       | 0.0263                    |
| 6        | 76       | 0.0263                    |
| 7        | 77       | 0.0260                    |
| 8        | 78       | 0.0256                    |
| 9        | 76       | 0.0263                    |
| 10       | 78       | 0.0256                    |

จากผลการทดลองพบว่าอัตราการไหลเชิงมวลของน้ำที่ไหลภายในท่อของระบบ มีค่าเฉลี่ยเป็น 0.0263 กิโลกรัม/วินาที ซึ่งอัตราการไหลเชิงมวลเฉลี่ยนี้จะนำไปใช้ในการคำนวณหาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของรางรวมแสงอาทิตย์แบบพาราโบลิตที่ประดิษฐ์ขึ้นต่อไป

#### 4.2 วัดอุณหภูมิน้ำขาเข้าระบบ อุณหภูมิน้ำขาออกจากระบบ และความเข้มรังสีอาทิตย์รวม

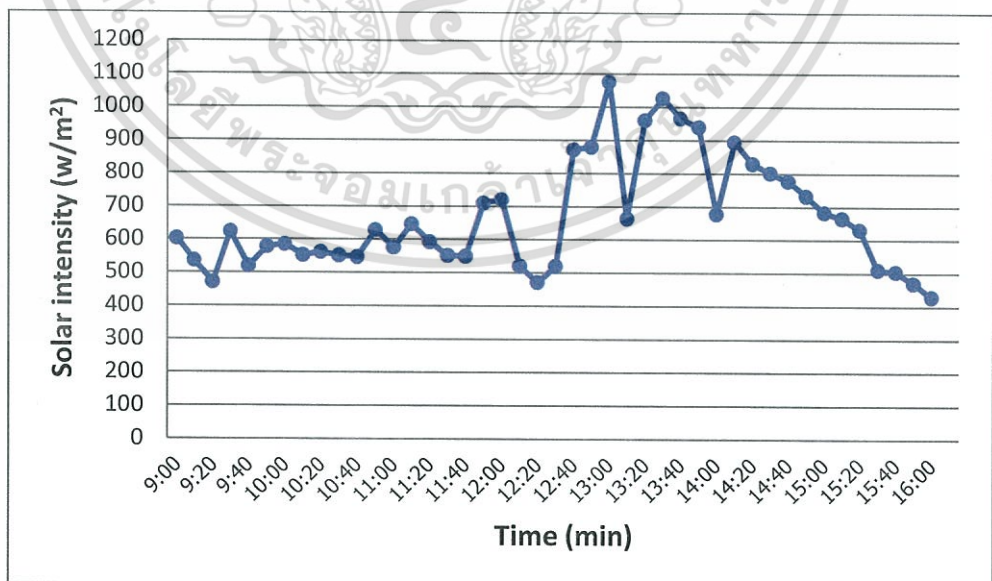
จากการทดลองเพื่อวัดอุณหภูมิน้ำขาเข้าระบบ และอุณหภูมิน้ำขาออกจากระบบ พบว่าอุณหภูมิของน้ำค่อยๆเพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่มีอุณหภูมิสูงสุด แล้วอุณหภูมิจึงค่อยๆลดลง ซึ่งอุณหภูมิน้ำขาเข้าระบบสูงสุดเป็น 46.4 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิน้ำขาออกจากระบบสูงสุดเป็น 55.9 องศาเซลเซียส ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิน้ำขาเข้าระบบและอุณหภูมิน้ำขาออกจากระบบสูงสุดเป็น 14.1 องศาเซลเซียส ที่เวลา 13.00 น. ดังที่แสดงในรูปที่ 4.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างอุณหภูมิน้ำขาเข้า ( $T_i$ ) และอุณหภูมิน้ำขาออกจากระบบ ( $T_o$ ) ตั้งแต่เวลา 09.00 น.-16.00 น. ทุกๆ 10 นาที เมื่อวันที่ 26 พฤษภาคม 2559

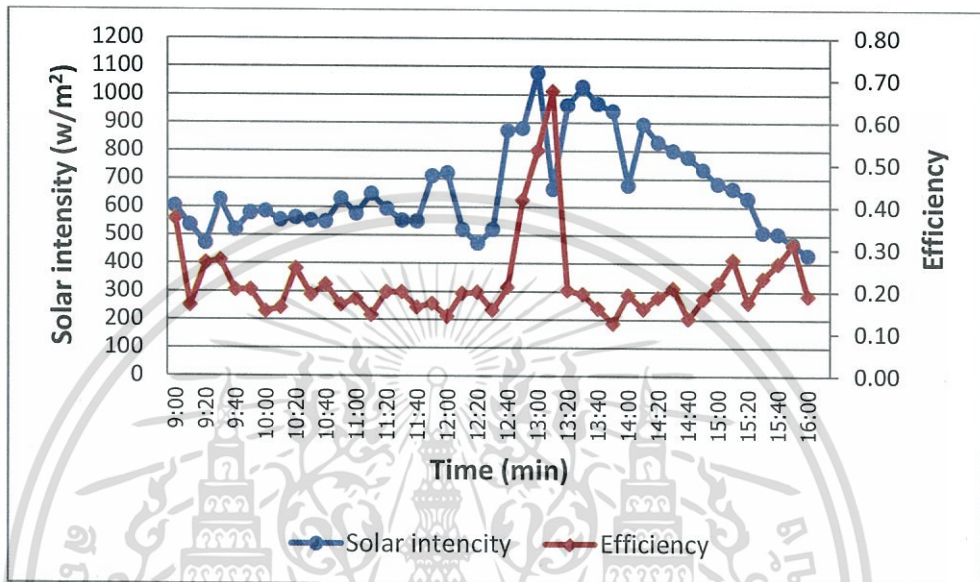
ความเข้มรังสีอาทิตย์รวมที่วัดได้เมื่อวันที่ 26 พฤษภาคม 2559 แสดงดังรูปที่ 4.2 จะเห็นว่าความเข้มรังสีอาทิตย์รวมมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นในช่วงเช้าจนถึงเวลา 13.00 น. ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่มีความเข้มรังสีอาทิตย์รวมสูงสุดเป็น 1,077.17 วัตต์/ตารางเมตร จากนั้นความเข้มรังสีอาทิตย์รวมจึงค่อยๆ ลดลง และเนื่องจากในวันที่ทดลองมีปริมาณเมฆมากจึงทำให้ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์รวมไม่ค่อยสม่ำเสมอ



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความเข้มรังสีอาทิตย์รวม ( $I_T$ ) ตั้งแต่เวลา 09.00 น.-16.00 น. เมื่อวันที่ 26 พฤษภาคม 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากทำการทดลองเพื่อหาอัตราการไหลเชิงมวลของน้ำที่ไหลภายในท่อของระบบ อุณหภูมิน้ำขาเข้าระบบ อุณหภูมิน้ำขาออกจากระบบ และความเข้มรังสีอาทิตย์รวมแล้ว ก็สามารถคำนวณหาประสิทธิภาพเชิงความร้อน ณ ขณะใดขณะหนึ่ง เมื่อวันที่ 26 พฤษภาคม 2559 ของระบบ รางรวมแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาที่ประดิษฐ์ขึ้นได้จากสมการที่ (2.5) ผลของประสิทธิภาพเชิงความร้อนแสดงดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มรังสีอาทิตย์รวม ( $I_t$ ) และประสิทธิภาพทางความร้อนของรางรวมแสง ( $\eta$ ) ที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา ตั้งแต่ 09.00 น. – 16.00 น. เมื่อวันที่ 26 พฤษภาคม 2559

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพทางความร้อนของระบบรางรวมแสงอาทิตย์แบบพาราโบลา กับความเข้มรังสีอาทิตย์รวมที่เวลาตั้งแต่ 09.00 น. – 16.00 น. ของวันที่ 26 พฤษภาคม 2559 พบว่าประสิทธิภาพทางความร้อน ( $\eta$ ) สูงสุดเป็น 0.6749 ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่รางรวมแสงได้รับความเข้มรังสีอาทิตย์รวมสูงที่สุดและมีความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิน้ำขาเข้าระบบและอุณหภูมิน้ำขาออกจากระบบสูงสุดด้วย

## บทที่ 5

# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาระบบรางรวมแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาโดยการสร้างระบบรางรวมแสงอาทิตย์ที่มีขนาดของรางแบบพาราโบลากว้าง 60 เซนติเมตร ยาว 150 เซนติเมตร เป็นจำนวน 3 ราง มีพื้นที่รับรังสีอาทิตย์เท่ากับ 2.7 ตารางเมตร มีวัสดุสะท้อนแสงโค้งหน้าตัดรูปพาราโบลาเป็นแผ่นสแตนเลสผิวกระจกเพื่อสะท้อนแสงที่ได้รับไปยังจุดโฟกัสที่ระยะ 10 เซนติเมตร ที่เป็นท่อดูดซับรังสียาว 180 เซนติเมตร ภายในท่อดูดซับรังสีถูกบรรจุด้วยท่อทองแดงขดเป็นรูปตัวยูเพื่อเป็นทางเดินของน้ำ โดยในการทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพทางความร้อนของระบบรางรวมแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาที่ประดิษฐ์ขึ้นได้อ้างอิงจากมาตรฐาน ASHRAE 93-77 ซึ่งแบ่งการทดลองเป็น 2 ตอน คือ การทดลองเพื่อหาอัตราการไหลเชิงมวลของน้ำที่ไหลภายในท่อ และการวัดอุณหภูมิน้ำขาเข้าระบบอุณหภูมิน้ำขาออกจากระบบ รวมถึงความเข้มรังสีอาทิตย์รวมที่รางได้รับขณะวัดอุณหภูมิ

การทดลองเพื่อหาอัตราการไหลเชิงมวลของน้ำที่ไหลภายในท่อพบว่าเวลาเฉลี่ยที่น้ำไหลเป็นปริมาณ 2,000 มิลลิลิตรเท่ากับ 71.1 วินาที และหาอัตราการไหลเชิงมวลเฉลี่ยได้เป็น 0.0263 กิโลกรัม/วินาที

การทดลองเพื่อหาอุณหภูมิน้ำขาเข้าระบบ อุณหภูมิน้ำขาออกจากระบบ และความเข้มรังสีอาทิตย์ที่รางได้รับเมื่อวันที่ 26 พฤษภาคม 2559 ตั้งแต่เวลา 09.00 น.-16.00 น. พบว่าระบบรางรวมแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาสามารถผลิตน้ำร้อนได้อุณหภูมิสูงสุดเป็น 55.9 องศาเซลเซียส ความแตกต่างของอุณหภูมิน้ำขาเข้าและอุณหภูมิน้ำขาออกสูงสุดเป็น 14.1 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่ได้รับความเข้มรังสีอาทิตย์รวมสูงสุดเป็น 1,077.17 วัตต์/ตารางเมตร และเมื่อคำนวณหาประสิทธิภาพทางความร้อน ณ ขณะใดขณะหนึ่งของรางรวมแสงที่ประดิษฐ์ขึ้นตามมาตรฐาน ASHRAE 93-77 พบว่ามีประสิทธิภาพสูงสุดเท่ากับ 67.49%

### 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ระบบรางรวมแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาที่ประดิษฐ์ขึ้นได้ออกแบบให้ตัวรางสามารถหมุนได้ 360 องศา เพื่อในอนาคตจะได้พัฒนาให้รางรวมแสงมีการติดตั้งระบบติดตามดวงอาทิตย์เพื่อให้รางเอียงรับรังสีอาทิตย์ให้มากที่สุดตามช่วงเวลาต่างๆ ก็จะทำให้ประสิทธิภาพทางความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้น

2. ในการหาประสิทธิภาพทางความร้อนของรางรวมแสงควรศึกษาหาเทคนิคที่มีความแม่นยำมากกว่านี้เพื่อให้ได้ค่าประสิทธิภาพที่ถูกต้องแม่นยำที่สุด

## เอกสารอ้างอิง

- [1.] ผศ.ดร.สกนธ์ คล่องบุญจิต. 2552. ความรู้พื้นฐานระบบน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ในงานอุตสาหกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : มีน เซอร์วิส ซัพพลาย
- [2.] มานิจ ทองประเสริฐและสมศรี จรุงเรือง. 2524. พลังงานแสงอาทิตย์ ทฤษฎีและการใช้ประโยชน์ทางความร้อน. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ. ม.ป.ท.
- [3.] Avadhesh Yadav, Manoj Kumar, Balram. 2013. Experimental study and analysis of parabolic trough collector with various reflectors. [Online]. Available : <http://waset.org/publications/9996680/experimental-study-and-analysis-of-parabolic-trough-collector-with-various-reflectors>.
- [4.] ทนงศักดิ์ วัฒนา. 2556. รู้จักและการเลือกใช้เทคโนโลยีการผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์. [Online]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.thailandindustry.com/guru/view.php?id=19409&section=9>.
- [5.] William B. Stine, Michael Geyer. 2015. Chapter 8 Concentrator Optics. [Online]. Available <http://www.powerfromthesun.net/Book/chapter08/chapter08.html>.
- [6.] ปิยะพงษ์ ศรีสวัสดิ์, สิทธิไชยวัฒน์ โกพลรัตน์. 2553. ร่างพาราโบลีครวมแสงอาทิตย์ที่มีระบบเคลื่อนที่ติดตามดวงอาทิตย์อัตโนมัติแบบแกนเดียว. [Online]. เข้าถึงได้จาก : [https://app.enit.kku.ac.th/mis/administrator/doc\\_upload/20110310162151.pdf](https://app.enit.kku.ac.th/mis/administrator/doc_upload/20110310162151.pdf).
- [7.] รศ.ดร.ประกอบ สุรวฒนาวรรณ, อธิภัทร หลิมบุญเรือง. 2558. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการออกแบบตัวรับรังสีดวงอาทิตย์แบบรางพาราโบลา. [Online]. เข้าถึงได้จาก : [http://www.acat.or.th/download/acat\\_or\\_th/journal-16/16%20-%2012.pdf](http://www.acat.or.th/download/acat_or_th/journal-16/16%20-%2012.pdf).
- [8.] สรวิต สอนสารี และคณะ. 2557. “การพัฒนาตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรูปประกอบพาราโบลา.” วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา. 19(2) : 105-121.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงผลการทดลอง

| Time  | $T_{in}$ (°C) | $T_{out}$ (°C) | $T_{out}-T_{in}$ | $I_t$ (W/m <sup>2</sup> ) | $\eta$ |
|-------|---------------|----------------|------------------|---------------------------|--------|
| 09:00 | 32.1          | 37.6           | 5.5              | 602.36                    | 0.3723 |
| 09:10 | 34.0          | 36.2           | 2.2              | 535.43                    | 0.1675 |
| 09:20 | 34.4          | 37.5           | 3.1              | 470.87                    | 0.2684 |
| 09:30 | 34.4          | 38.6           | 4.2              | 623.62                    | 0.2746 |
| 09:40 | 35.6          | 38.2           | 2.6              | 518.90                    | 0.2043 |
| 09:50 | 35.5          | 38.4           | 2.9              | 577.95                    | 0.2046 |
| 10:00 | 35.7          | 37.9           | 2.2              | 585.04                    | 0.1533 |
| 10:10 | 36.1          | 38.3           | 2.2              | 552.76                    | 0.1623 |
| 10:20 | 36.2          | 39.7           | 3.5              | 561.42                    | 0.2542 |
| 10:30 | 36.9          | 39.5           | 2.6              | 551.18                    | 0.1923 |
| 10:40 | 36.7          | 39.6           | 2.9              | 547.24                    | 0.2161 |
| 10:50 | 37.8          | 40.4           | 2.6              | 628.35                    | 0.1687 |
| 11:00 | 37.6          | 40.2           | 2.6              | 576.38                    | 0.1839 |
| 11:10 | 38.0          | 40.3           | 2.3              | 646.46                    | 0.1451 |
| 11:20 | 38.4          | 41.3           | 2.9              | 592.91                    | 0.1994 |
| 11:30 | 37.8          | 40.5           | 2.7              | 551.97                    | 0.1995 |
| 11:40 | 38.6          | 40.8           | 2.2              | 549.61                    | 0.1632 |
| 11:50 | 39.3          | 42.3           | 3.0              | 710.24                    | 0.1722 |
| 12:00 | 39.6          | 42.1           | 2.5              | 721.26                    | 0.1413 |
| 12:10 | 39.0          | 41.5           | 2.5              | 520.47                    | 0.1959 |
| 12:20 | 38.9          | 41.2           | 2.3              | 471.65                    | 0.1988 |
| 12:30 | 38.7          | 40.7           | 2.0              | 521.26                    | 0.1564 |
| 12:40 | 40.1          | 44.6           | 4.5              | 872.44                    | 0.2103 |
| 12:50 | 41.4          | 50.4           | 9.0              | 880.31                    | 0.4169 |
| 13:00 | 41.8          | 55.9           | 14.1             | 1077.17                   | 0.5337 |
| 13:10 | 42.5          | 53.5           | 11               | 664.57                    | 0.6749 |
| 13:20 | 46.4          | 51.2           | 4.8              | 961.42                    | 0.2036 |
| 13:30 | 43.6          | 48.5           | 4.9              | 1027.56                   | 0.1944 |
| 13:40 | 44.7          | 48.5           | 3.8              | 966.93                    | 0.1602 |
| 13:50 | 45.3          | 48.2           | 2.9              | 940.94                    | 0.1257 |
| 14:00 | 44.3          | 47.5           | 3.2              | 677.95                    | 0.1925 |
| 14:10 | 43.5          | 47.0           | 3.5              | 895.28                    | 0.1594 |
| 14:20 | 43.0          | 46.8           | 3.8              | 830.71                    | 0.1865 |
| 14:30 | 42.5          | 46.6           | 4.1              | 801.57                    | 0.2086 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

|       |      |      |     |        |        |
|-------|------|------|-----|--------|--------|
| 14:40 | 42.7 | 45.3 | 2.6 | 777.95 | 0.1363 |
| 14:50 | 42.2 | 45.5 | 3.3 | 733.07 | 0.1836 |
| 15:00 | 41.6 | 45.3 | 3.7 | 683.46 | 0.2207 |
| 15:10 | 41.5 | 46.0 | 4.5 | 665.35 | 0.2758 |
| 15:20 | 41.1 | 43.8 | 2.7 | 630.71 | 0.1746 |
| 15:30 | 40.3 | 43.2 | 2.9 | 510.24 | 0.2317 |
| 15:40 | 40.2 | 43.5 | 3.3 | 504.72 | 0.2666 |
| 15:50 | 39.4 | 43.0 | 3.6 | 470.08 | 0.3123 |
| 16:00 | 39.4 | 41.4 | 2.0 | 429.13 | 0.1900 |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้