สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

# เครื่องเก็บความร้อนจากแสงอาทิตย์สำหรับการอบแห้งธัญญพืช

เทิดทูล บุญญนวฤทธิ์
วิชยา อ่อนราษฎร์

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 73351
วัน,เดือน,ปี 13 ก.ค. 2550

b 11292152
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# Solar Collector for Crop Drying

TERDTOOL BOONYANAWARIT

WITCHAYA ONRAJ

A REPORT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF

BACHELOR OF ENGINEERING IN CHEMICAL ENGINEERING

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2005

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | |
|---|---|
| ปริญญานิพนธ์เรื่อง | เครื่องเก็บความร้อนจากแสงอาทิตย์สำหรับการอบแห้งธัญญพืช |
| โดย | นายเทิดทูล บุญญนวฤทธิ์ |
| | นายวิชยา อ่อนราษฎร์ |
| อาจารย์ที่ผู้ควบคุม | รศ. ดร. ไพศาล นาคพิพัฒน์ |
| ปริญญานิพนธ์ | ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล. |

---

ปริญญานิพนธ์นี้ได้รับพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รศ. ดร. ไพศาล นาคพิพัฒน์)

.....กรรมการ
(ดร. นริศรา ทองบุญชู)

.....กรรมการ
(อาจารย์บุญชัย โชติวิริยวาณิชย์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง เครื่องเก็บความร้อนจากแสงอาทิตย์สำหรับการอบแห้งธัญญพืช

โดย นายเทิดทูล บุญญนวฤทธิ์
นายวิชยา อ่อนราษฎร์
อาจารย์ที่ปรึกษา รศ. ดร. ไพศาล นาคพิพัฒน์
ปริญญานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

โครงงานนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและประเมินสมรรถนะของเครื่องเก็บความร้อนจากแสงอาทิตย์สำหรับการอบแห้งธัญญพืช โดยใช้เครื่องเก็บความร้อนจากแสงอาทิตย์แบบปิดชนิดแบบไหลสองเที่ยวซึ่งมีโครงสร้างที่ง่ายและราคาประหยัด เครื่องเก็บความร้อนจากแสงอาทิตย์ชนิดให้ความร้อนกับอากาศนี้จะประกอบด้วย แผ่นเก็บความร้อนวางอยู่ระหว่างแผ่นปิดและชั้นของฉนวน อากาศจะไหลผ่านช่องระหว่างแผ่นเก็บความร้อน แผ่นปิดและชั้นของฉนวน จะ ถูกทำให้ร้อนและส่งผ่านไปยังเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดเพื่อใช้ในการอบแห้งธัญญพืช โดยอากาศที่ผ่านเครื่องอบแห้งจะถูกมาเวียนกลับสู่เครื่องเก็บความร้อนจากแสงอาทิตย์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน

เครื่องเก็บความร้อนจากแสงอาทิตย์ชนิดปิดประกอบด้วยแผ่นเก็บความร้อนที่ทำจากแผ่นอะลูมิเนียมแบบที่ทาสีดำขนาด 1.22 x 1.98 x 0.01 เมตร(กว้าง x ยาว x สูง) แผ่นกระจก และ ฉนวนใยแก้ว หนา 1 และ 5 เซนติเมตร ตามลำดับ การศึกษาหาสภาวะการทำงานที่จะทำให้มีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนสูงสุด กระทำโดยแปรเปลี่ยนระยะห่างระหว่าง เครื่องเก็บกับความร้อนกับแหล่งกำเนิดความร้อน ตั้งแต่ 0.85, 0.9 และ 1.0 เมตร และความเร็วลมตั้งแต่ 5-18 เมตรต่อวินาที จากการศึกษาพบว่าที่ระยะห่าง 0.85 เมตร ให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนดีกว่าที่ระยะ 0.9 และ 1 เมตร และที่ความเร็วของลมต่ำจะให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าที่ความเร็วสูงๆ นอกจากนี้ผลของความเร็วลมที่มีต่อประสิทธิภาพการอบแห้งยังได้ทำการศึกษาโดยการผ่านลมร้อนที่ความเร็วต่างๆเพื่อไปอบแห้งเมล็ดข้าวเปลือกในเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด จากการศึกษาพบว่าที่ความเร็วลมต่ำสามารถลดความชื้นในข้าวเปลือกได้ดีกว่าที่ความเร็วสูง ซึ่งยืนยันได้ว่าการใช้งานของเครื่องเก็บความร้อนจากแสงอาทิตย์ที่ความเร็วต่ำมีความเหมาะสมที่สุด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Report Title Solar Collector for Crop Drying

By Mr.Terdtool Boonyanawarit

Mr.Wichaya Onraj

Advisor Assoc.Prof.Dr.Paisal Nakpipat

Report for Bachelor Degree of Chemical Engineering

Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

**Abstract**

This project is aim to design and performance evaluation of solar collector for crop drying. The double passed suspended-plate covered solar collector is used for this study from the simple construction and economical. This solar-energy air heating solar collector consists of an absorber plate that fixed between cover material and layer of insulation. The air to be heated flow double passed through a duct between cover material, absorber plate, and insulation. The hot air is later used for drying crop by passing through fluidized bed dryer and the air that passed through dryer is recycled back to the solar collector to enhance energy transfer efficiency.

The covered solar collector is consisted of an absorber plate made of black painted flat aluminum plate with dimension 1.22 x 1.98 x 0.01 m (w x L x h), a glass cover plate with and glass fiber insulation with thickness of 1 and 5 centimeter, respectively. The performance condition that yield maximum efficiency of heat transfer was studied by vary the distance between collector and heat source from 0.85, 0.9, and 1.0 meter and wind speed from 5-18 meter/s. This study found that at 0.85 meter yield the higher efficiency than that of 0.9 and 1.0 meter and at the lower wind speed is also got the higher efficiency that of higher winds speed. Therefore, the lowest distance and low wind speed is the most suitable working condition. In addition, the effect of wind speed on drying performance is also performed by passing hot air at various speeds to dry rice grain in fluidized bed dryer. The results show that at low wind speed reduces more humidity in rice grain than that of at higher speed. The effect is also confirmed that the lower wind speed is the most suitable working condition to operate solar collector for crop drying.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ. ดร. ไพศาล นาคพิพัฒน์ ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีตลอดระยะเวลาการทำโครงงาน

ขอขอบพระคุณ ดร.นริศรา ทองบุญชู และอาจารย์บุญชัย โชติวิริยวาณิชย์ ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำตลอดจนข้อชี้แนะช่วยตรวจสอบหัวข้อแก้ไขหัวข้อและโครงร่างปริญญานิพนธ์ จนในที่สุดทำให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์

ขอขอบคุณ คุณพิสันต์ ผลโพธิ์ เจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมเคมี ที่ช่วยในการติดตั้งอุปกรณ์และแนะแนวในการปฏิบัติงานตลอดระยะเวลาโครงงาน

สุดท้ายนี้คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณบุพการีซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ที่ให้กำลังใจตลอดมาตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิประสาทความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดี

คณะผู้จัดทำ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....II

กิตติกรรมประกาศ.....III

สารบัญ.....IV

สารบัญตาราง.....VI

สารบัญรูป.....VII

สัญลักษณ์.....VIII

บทที่ 1 บทนำ.....1

1.1 ที่มาของปริญญานิพนธ์.....1

1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญานิพนธ์.....2

1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์.....2

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....2

บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ.....3

2.1 แผงรับพลังงานแสงอาทิตย์.....3

2.2 ส่วนประกอบพื้นฐานที่สำคัญของแผงรับแสงอาทิตย์แผ่นราบ.....4

2.3 แผงรับแสงอาทิตย์ชนิดแผ่นราบ.....5

2.3.1 แผงรับแสงอาทิตย์ที่ทำให้อากาศร้อนแบบแผ่นเปลือย.....5

2.3.2 แผงรับแสงอาทิตย์ที่ทำให้อากาศร้อนแบบแผ่นปิด.....6

2.4 สรุปการออกแบบแผงรับแสงอาทิตย์.....7

2.5 ส่วนต่างๆ ของพลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบแผงรับแสงอาทิตย์.....8

2.5.1 การเพิ่มประสิทธิภาพให้กับแผงรับแสงอาทิตย์แผ่นราบ.....9

2.6 ทฤษฎีการหาค่าประสิทธิภาพของแผงรับแสงอาทิตย์แบบแผ่นราบ.....10

2.6.1 การคำนวณอัตราการสูญเสียพลังงานความร้อนจากแผงรับแสงอาทิตย์.....11

2.6.2 การคำนวณอัตราการส่งผ่านความร้อนไปสู่อากาศ.....13

2.6.3 การคำนวณอุณหภูมิที่ออกจากแผงรับแสงอาทิตย์.....13

2.6.4 การคำนวณประสิทธิภาพของแผงรับแสงอาทิตย์.....13

2.7 กระบวนการอบแห้ง.....14



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ (ต่อ)

หน้า


บทที่ 3 การสร้างและการออกแบบ....16

3.1 แผงรับพลังงานแสงอาทิตย์....16

3.2 คอลัมน์อบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด....18

3.3 เครื่องไซโคลน....20

3.4 พัดลมดูดอากาศ....22

3.5 ระบบท่อต่อเชื่อมอุปกรณ์....22

3.6 หลักการทำงานของเครื่องเก็บความร้อนจากแสงอาทิตย์สำหรับการอบแห้งธัญพืช....23

บทที่ 4 วิธีดำเนินการทดลอง....24

4.1 ศึกษาการหาประสิทธิภาพของแผงรับแสงอาทิตย์....24

4.3 ศึกษาการหาความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือก ที่ได้หลังการอบแห้ง....26

บทที่ 5 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล....27

5.1 ศึกษาการหาประสิทธิภาพของแผงรับแสงอาทิตย์....27

5.2 ผลการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้นของเมล็ด ข้าวเปลือกที่ได้หลังจากการอบแห้งกับความเร็วลมที่ใช้ในการอบแห้ง....30

บทที่ 6 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ....31

6.1 ข้อเสนอแนะ....32

เอกสารอ้างอิง....33

ภาคผนวก....34

ภาคผนวก ก ตัวอย่างการคำนวณ....35

ภาคผนวก ข ค่าพลังงานแสงอาทิตย์ประจำปี พ.ศ. 2540....42

ภาคผนวก ค ผลการทดลอง....43

ภาคผนวก ง เครื่องเก็บความร้อนจากแสงอาทิตย์สำหรับการอบแห้งธัญพืช....49




เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง


ตารางที่ หน้า

2.1 การสูญเสียความร้อนของแผงรับแสงอาทิตย์แผ่นราบทั่วๆไป.....9

5.1 พลังงานความร้อนของแผงให้ความร้อนโดยเฉลี่ยที่ให้ความร้อน
กับแผงรับแสงอาทิตย์.....27

ข.1 ค่าพลังงานแสงอาทิตย์ประจำปี พ.ศ. 2540.....42

ค 1.1 การทดลองหาความร้อนของแผงให้ความร้อนความสูงจากระนาบแผง 1 เมตร.....43

ค 1.2 การทดลองหาความร้อนของแผงให้ความร้อนความสูงจากระนาบแผง 0.9 เมตร.....43

ค 1.1 การทดลองหาความร้อนของแผงให้ความร้อนความสูงจากระนาบแผง 0.85 เมตร.....44

ค 1.4 การหาประสิทธิภาพแผงรับแสงอาทิตย์ที่ความสูงของแผงให้ความร้อน 1 เมตร.....44

ค 1.5 การหาประสิทธิภาพแผงรับแสงอาทิตย์ที่ความสูงของแผงให้ความร้อน 0.9 เมตร.....45

ค 1.6 การหาประสิทธิภาพแผงรับแสงอาทิตย์ที่ความสูงของแผงให้ความร้อน 0.85 เมตร.....45

ค 2.1 ผลการทดลองหาน้ำหนักแห้งสุทธิของเมล็ดข้าวเปลือก.....46

ค 2.2 ผลการหาเปอร์เซ็นต์ความชื้นที่เหลือในเมล็ดข้าวเปลือก
ที่ระดับความสูงแผงให้ความร้อน 1 เมตร.....46

ค 2.3 ผลการหาเปอร์เซ็นต์ความชื้นที่เหลือในเมล็ดข้าวเปลือก
ที่ระดับความสูงแผงให้ความร้อน 0.9 เมตร.....47

ค 2.4 ผลการหาเปอร์เซ็นต์ความชื้นที่เหลือในเมล็ดข้าวเปลือก
ที่ระดับความสูงแผงให้ความร้อน 0.85 เมตร.....48




เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป


รูปที่ หน้า

2.1 แผงรับพลังงานความร้อนแสงอาทิตย์แบบแผ่นเปลือย.....5

2.2 แผงรับพลังงานแสงอาทิตย์แบบช่องอากาศผ่านด้านหน้าแผ่นตัวกักเก็บ.....6

2.3 แผงรับพลังงานแสงอาทิตย์แบบช่องอากาศผ่านด้านข้างล่างของแผ่นกักเก็บ.....7

2.4 แผงรับพลังงานแสงอาทิตย์แบบปิดชนิดแผ่นแขวน (a) ทิศทางขนานกัน
(b) แบบสองเที่ยว (ไปและกลับ).....7

2.5 ส่วนต่างๆ ของพลังแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบแผงรับแสงอาทิตย์.....8

2.6 การอบแห้งกับเวลา.....15

3.1 ส่วนประกอบของแผงรับพลังงานแสงอาทิตย์.....17

3.2 ส่วนประกอบของฟลูอิดไดซ์เบดคอลัมน์.....19

3.3 ส่วนประกอบของไซโคลน.....21

3.4 เครื่องพัดลมดูดอากาศ (Blower).....22

3.6 ส่วนประกอบเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดโดยใช้แผงรับแสงอาทิตย์.....23

4.1 รูปตำแหน่งข้อมูลที่ทำการศึกษา.....25

5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมและประสิทธิภาพแผงรับแสงอาทิตย์ที่ความสูงของ
แผงให้ความร้อน 1 เมตร.....28

5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมและประสิทธิภาพแผงรับแสงอาทิตย์
ที่ความสูงของแผงให้ความร้อน 0.9 เมตร.....28

5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมและประสิทธิภาพแผงรับแสงอาทิตย์
ที่ความสูงของแผงให้ความร้อน 0.85 เมตร.....29

5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมกับเปอร์เซ็นต์ความชื้นในเมล็ดข้าวเปลือก.....30

ง.1.1 เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด.....50

ง.1.2 แผงรับพลังงานแสงอาทิตย์.....51

ง.1.3 ลักษณะของท่อทางไหลของลมร้อนและท่อลมนำกลับมาหมุนเวียนใหม่.....51

ง.1.4 พัดลมดูดอากาศและอุปกรณ์สวิตซ์เปิด-ปิด.....52

ง.1.5 คอลัมน์อบแห้ง.....52

ง.1.6 อุปกรณ์เครื่องไซโคลน.....53




เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สัญลักษณ์

| | |
|---|---|
| $A$ | พื้นที่ของแผงรับแสงอาทิตย์ (ตารางเมตร) |
| $A_C$ | พื้นที่ผิวรับรังสี (ตารางเมตร) |
| $A_g$ | พื้นที่หน้าตัดที่อากาศไหลเข้าสู่แผ่นรับแสงอาทิตย์ (ตารางกิโลเมตร) |
| $C_p$ | ความจุความร้อนจำเพาะของของไหล (จูล/กิโลกรัม-เคลวิน) |
| $C_{p,avg}$ | ความจุความร้อนจำเพาะเฉลี่ยของอากาศภายในแผงรับแสงอาทิตย์(จูล/กิโลกรัม- องศาเคลวิน) |
| $H$ | อัตราการตกกระทบของรังสีแสงอาทิตย์ทั้งรังสีตรงและรังสีกระจายบนพื้นที่หนึ่งหน่วยบนแผงรับแสงอาทิตย์ (วัตต์/ตารางเมตร) |
| $h_w$ | สัมประสิทธิการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากลม (วัตต์/ตารางเมตร-องศาเคลวิน) |
| $k$ | สภาพนำความร้อนของอากาศ (วัตต์/ตารางเมตร-องศาเคลวิน) |
| $K_y$ | สภาพนำความร้อนของฉนวน (วัตต์/เมตร-องศาเคลวิน) |
| $L$ | ความยาวของแผงรับแสงอาทิตย์ |
| $m$ | อัตราการไหลโดยมวลของอากาศที่เข้าสู่แผงรับแสงอาทิตย์ (กิโลกรัม/วินาที) |
| $N_{pr}$ | Prandtl number $= C_p\mu/k$ |
| $N_{re}$ | Reynolds number $= Lu\rho/\mu$ |
| $Q_l$ | อัตราการสูญเสียพลังงานความร้อนโดยการพาความร้อน การนำความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน (วัตต์) |
| $Q_{Lb}$ | พลังงานความร้อนที่สูญเสียทางด้านล่าง (Back heat loss) (วัตต์) |
| $Q_{Lt}$ | พลังงานความร้อนที่สูญเสียทางด้านบน (Top heat loss) (วัตต์) |
| $Q_S$ | อัตราการสะสมพลังงานความร้อนที่ผิวรับรังสี (วัตต์) |
| $Q_u$ | ความร้อนที่ได้จากแผงรับแสงอาทิตย์ (วัตต์) |
| $T$ | อุณหภูมิ (เคลวิน) |
| $T_a$ | อุณหภูมิล้อมรอบ (เคลวิน) |
| $T_A$ | อุณหภูมิของแผ่นอลูมิเนียมชั้นล่างของแผง (องศาเคลวิน) |
| $T_h$ | อุณหภูมิของฮีทเตอร์ (องศาเคลวิน) |
| $T_y$ | อุณหภูมิของฉนวน องศาเคลวิน) |
| $T_{out}$ | อุณหภูมิของอากาศที่ออกจากแผงรับแสงอาทิตย์ (องศาเคลวิน) |
| $T_i$ | อุณหภูมิของอากาศที่เข้าสู่แผงรับแสงอาทิตย์ (องศาเคลวิน) |
| $X$ | ความหนาของฉนวน (เมตร) |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สัญลักษณ์ (ต่อ)

$U_{avg}$ ความเร็วลมเฉลี่ย (เมตร/วินาที)

$U_1$ ความเร็วลมต่ำสุด (เมตร/วินาที)

$U_2$ ความเร็วลมสูงสุด (เมตร/วินาที)

$U_t$ สัมประสิทธิการสูญเสียความร้อนทางด้านบน (วัตต์/ตารางเมตร-องศาเคลวิน)

$V_b$ ความเร็วของอากาศที่ไหลเข้าสู่แผงรับแสงอาทิตย์ (เมตร/วินาที)

$W_1$ อัตราส่วนการถ่วงน้ำหนักของการเกิดความเร็วลมต่ำสุด

$W_2$ อัตราส่วนการถ่วงน้ำหนักของการเกิดความเร็วลมสูงสุด

$\rho$ ความหนาแน่นของอากาศที่เข้าสู่แผงรับแสงอาทิตย์ (กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)

$\tau\alpha$ ผลคูณระหว่างค่าการทะลุผ่านและค่าการดูดซับรังสีของกระจก

$\varepsilon_w$ ค่าการส่งออกรังสีความร้อนของกระจก

$\varepsilon_H$ ค่าการส่งออกของรังสีความร้อนของฮีทเตอร์ที่ทำจากเซรามิค

$\sigma$ ค่าคงที่ Boltzmann (วัตต์ /( เมตร )$^2$(องศาเคลวิน)$^4$)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1
# บทนำ

## 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจ นำไปสู่การใช้ทรัพยากรอย่างปราศจากการควบคุม ซึ่งส่งผลทำให้ทรัพยากรธรรมชาติลดน้อยลงเรื่อยๆ จากวิกฤติการณ์พลังงานที่เกิดขึ้น สภาวะเศรษฐกิจที่ฝืดเคือง อีกทั้งราคาน้ำมันที่แพงขึ้นเป็นเท่าตัว ทำให้นำไปสู่การแสวงหาแหล่งทรัพยากรพลังงานอื่นมาทดแทนน้ำมัน โดยทั่วไปสามารถจำแนกทรัพยากรพลังงานออกเป็นทรัพยากรที่ใช้แล้วหมดไปและทรัพยากรที่ใช้แล้วสามารถนำมาหมุนเวียนใช้ใหม่ได้ ทรัพยากรที่ใช้แล้วหมดไป ได้แก่ เชื้อเพลิง น้ำมันดิบ ถ่านหิน น้ำมัน ก๊าซธรรมชาติ ไฟฟ้า นิวเคลียร์ ฯลฯ ส่วนทรัพยากรที่ใช้แล้วสามารถนำมาหมุนเวียนใช้ใหม่ได้ ได้แก่ พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานน้ำ การนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้จึงเป็นทางเลือกหนึ่งในการแก้ไขปัญหาการขาดแคลนของพลังงานได้ จึงมีการนำพลังงงานแสงอาทิตย์มาใช้ประโยชน์มากขึ้นดังนั้น การหาวิธีการที่เหมาะสมในการเก็บและใช้พลังงานแสงอาทิตย์อย่างมีประสิทธิภาพ จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมและมีลักษณะร้อนชื้น ทำให้ได้รับความร้อนจากแสงอาทิตย์อย่างสม่ำเสมอตลอดทั้งปี จึงมีความเหมาะสมอย่างยิ่งที่จะนำพลังงานจากแสงอาทิตย์มาใช้ประโยชน์โดยเฉพาะจะนำมาใช้ในการอบแห้งธัญญพืช ซึ่งวิธีดั้งเดิมเช่น การตากแห้ง นั้นจะใช้เวลานานมากและใช้แรงงานสูง หากสามารถลดพลังงาน พื้นที่ เวลา และแรงงาน จะทำให้ต้นทุนการผลิตลดลง ส่งผลให้กำไรเพิ่มขึ้น เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว การประยุกต์นำความร้อนจากแสงอาทิตย์มาใช้งานในการอบแห้งธัญญพืช นั้นจะช่วยลดความชื้นที่มีอยู่ในธัญญพืช จึงเป็นเหตุผลสำคัญของการศึกษาโครงงานนี้

ในโครงงานพิเศษนี้ได้ทำการศึกษาแนวทางเบื้องต้น ในการนำเสนอปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของแผงรับแสงอาทิตย์และเปอร์เซ็นต์ความชื้นของวัสดุอบ เพื่อเป็นแนวทางในการสร้างเครื่องอบแห้งที่มีประสิทธิภาพและประหยัดพลังงาน

## 1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญานิพนธ์

1.2.1 ศึกษาหาเทคนิคการออกแบบแผงรับแสงอาทิตย์ให้มีประสิทธิภาพสูงสุด สำหรับเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดโดยใช้พลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์

1.2.2 ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการออกแบบแผงรับแสงอาทิตย์และนำเทคโนโลยีด้านวิศวกรรมเคมีมาประยุกต์ในอุตสาหกรรม

1.2.3 เพื่อหาแนวทางที่จะพัฒนาให้ดียิ่งขึ้นของแผงรับพลังงานแสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์

1.3.1 ศึกษากระบวนการทำงานของแผงรับแสงอาทิตย์

1.3.2 สร้างแผงรับแสงรับอาทิตย์สำหรับเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์

1.3.3 ทดสอบการทำงานและคำนวณหาประสิทธิภาพของแผงรับแสงอาทิตย์

1.3.4 ทำการทดลองอบแห้งเมล็ดธัญพืชและคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความชื้น

1.3.5 วิเคราะห์และสรุปผลโครงงาน

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ผลที่ได้รับจากการออกแบบสร้างอุปกรณ์ และเทคนิคในการประกอบเครื่องรวมถึง การทดลองเหล่านี้จะนำไปสู่การพัฒนาเทคโนโลยี เพื่อนำไปใช้ด้านอุตสาหกรรมต่างๆ

1.4.2 ก่อเกิดแนวคิดที่จะนำไปคิดค้นเครื่องมือที่สามารถดึงเอาพลังงานต่างๆ ที่อยู่ในธรรมชาติมาใช้ประโยชน์ให้คุ้มค่ามากที่สุด

1.4.3 ความรู้ความเข้าใจที่เกี่ยวข้องกับการทฤษฎีต่างๆ เพื่อช่วยสนับสนุนการพัฒนาเครื่องอบแห้งต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 2
# ทฤษฎีและหลักการ

ในการออกแบบแผงรับพลังงานแสงอาทิตย์ ความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับชนิดของแผงรับแสงอาทิตย์และหลักการอบแห้งเป็นสิ่งจำเป็น ดังนั้นในบทนี้จะอธิบายถึงหลักการดังกล่าวต่อไปนี้

## 2.1 แผงรับพลังงานแสงอาทิตย์ [1]

พื้นที่ผิวของวัตถุใดก็ตามเมื่อได้รับแสงจากดวงอาทิตย์ส่องมากระทบ พื้นที่ผิวของวัตถุนั้นก็จะดูดความร้อนจากแสงอาทิตย์และสะสมไว้ ทำให้วัตถุนั้นมีอุณหภูมิสูงขึ้น ความสามารถในการดูดพลังงานความร้อนนี้จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัตถุแต่ละชนิด เมื่อวัตถุที่ได้รับแสงอาทิตย์ที่ส่องมากระทบมีอุณหภูมิสูงกว่าวัตถุอื่นที่อยู่รอบๆ เช่น อากาศ น้ำ ดิน วัตถุนั้นจะเริ่มถ่ายเทความร้อนที่สะสมเอาไว้ออกไป ปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทนี้ขึ้นอยู่กับความแตกต่างของอุณหภูมิและมวลของวัตถุทั้งสองดังนั้นเพื่อที่จะนำพลังงานความร้อนที่สะสมในวัตถุรับแสงอาทิตย์นี้ไปใช้ประโยชน์ให้ได้มากที่สุด กล่าวคือ มีการถ่ายเทความร้อนจากวัตถุรับแสงอาทิตย์ไปยังวัตถุที่เป็นตัวกลางมากที่สุดและมีการสูญเสียความร้อนน้อยที่สุด จึงต้องออกแบบและสร้างที่เก็บรวบรวมพลังงานขึ้นมา ซึ่งอุปกรณ์ส่วนนี้เรียกว่า แผงรับแสงอาทิตย์ ซึ่งสามารถรับได้ทั้งรังสีตรงและรังสีกระจาย ไม่จำเป็นต้องหมุนตามดวงอาทิตย์ และไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษามาก แผงรับแสงอาทิตย์โดยทั่วไปแบ่งประเภทได้หลายลักษณะ คือ

1. แบ่งตามอุณหภูมิที่ใช้งาน เช่น อุณหภูมิต่ำ (น้อยกว่า100 $^{\circ}$C) อุณหภูมิปานกลาง (100-300 $^{\circ}$C) และอุณหภูมิสูง (มากกว่า 500 $^{\circ}$C)
2. แบ่งตามตัวกลางหรือของไหลที่ใช้งาน เช่น อากาศ น้ำ สารละลายเอทิลีน ไกลคอลหรือฟรีออน
3. แบ่งตามลักษณะของผิวรับรังสี เช่น แผ่นราบ แผ่นโค้งรวมรังสีเป็นเส้นหรือรวมเป็นจุด

จากการศึกษาพบว่า แผงรับแสงอาทิตย์จะต้องหันหน้าเข้าหาดวงอาทิตย์และตั้งอยู่ในแนวตั้งฉากกับลำแสงจากดวงอาทิตย์ จึงสามารถรับแสงอาทิตย์และพลังงานความร้อนจากดวงอาทิตย์มากที่สุด นอกจากนี้แผงรับแสงอาทิตย์จะต้องสามารถส่งพลังงานความร้อนที่ได้รับต่อไปยังตัวกลางที่เก็บสะสมได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพเพื่อให้ความร้อนสูญเสียไปน้อยที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 ส่วนประกอบพื้นฐานที่สำคัญของแผงรับแสงอาทิตย์แผ่นราบ

ในงานวิจัยของโครงงานนี้ได้ออกแบบและศึกษาจากโครงงานที่ผ่านมาเพื่อที่จะหาจุดเด่นและจุดด้อยแล้วนำมาปรับปรุงเพื่อที่จะให้ดีขึ้นกว่าเดิม ในการออกแบบปัจจัยที่สำคัญจะประกอบด้วย

1. แผ่นรับแสง โดยทั่วไปจะเป็นแผ่นที่ฉาบด้วยสีดำด้านไว้เพื่อให้มีพฤติกรรมเช่นวัตถุดำ (วัตถุดำ คือตัวดูดรังสีความร้อนที่สมบูรณ์โดยไม่คำนึงถึงความยาวคลื่นและทิศทางรังสีตกกระทบวัตถุดำ) รังสีตกกระทบทั้งหมดจะถูกดูดเอาไว้ วัตถุดำเป็นเพียงวัตถุที่ถูกสมมติขึ้นมา เนื่องจากวัตถุจริงทั้งหลายจะสะท้อนรังสีบางส่วนและยอมให้รังสีบางส่วนทะลุได้ โดยธรรมชาติแม้ว่าจะไม่มีวัตถุดำที่แท้จริงเกิดขึ้นก็ตาม วัตถุบางชนิดก็มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับวัตถุดำเช่น แผ่นคาร์บอนดำหนาดูดรังสีความร้อนที่ตกกระทบทั้งหมดได้ประมาณ 99 เปอร์เซ็นต์ ก็อาจถือว่าเป็นวัตถุดำได้ เนื่องจากไม่มีการสะท้อนกลับของรังสี

2. แผ่นปิดคลุมหน้า โดยทั่วไปแล้ววัสดุที่ใช้ปิดแผงรับแสงอาทิตย์เป็นวัสดุที่ยอมให้แสงผ่านได้ เช่น กระจก แผ่นกระจกจะวางปิดด้านบนของแผงรับแสงอาทิตย์ เพราะฉะนั้นจะมีด้านหนึ่งของกระจกหันเข้าหาดวงอาทิตย์ส่วนอีกด้านหนึ่งหันลงข้างล่าง เมื่อแสงอาทิตย์กระทบแผงรับแสงอาทิตย์จึงเกิดการสูญเสียพลังงานโดยการสะท้อนกลับได้ คุณสมบัติที่สำคัญที่สุดอย่างหนึ่งของกระจกสำหรับแผงรับแสงอาทิตย์คือความสามารถในการยอมให้รังสีผ่านได้ ซึ่งวัดออกมาเป็นค่าการผ่านทะลุ โดยค่านี้ขึ้นอยู่กับค่าดรรชนีการหักเหของกระจก

การสูญเสียพลังงานจากแสงอาทิตย์โดยการดูดกลืนแสงอาทิตย์ของกระจกขึ้นอยู่กับปริมาณเหล็กอ๊อกไซด์ ($Fe_2O_3$) ในเนื้อกระจก ถ้ามีปริมาณเหล็กอ๊อกไซด์ น้อยจะดูดกลืนพลังงานได้เพียงเล็กน้อย แต่ถ้าเนื้อกระจกมีปริมาณเหล็กอ๊อกไซด์ มากจะดูดกลืนรังสีในช่วงอินฟาเรดไว้ วิธีหนึ่งที่จะทราบได้ว่ากระจกนั้นมีปริมาณเหล็กอ๊อกไซด์ มากหรือน้อย สังเกตได้จากสีของขอบกระจก ถ้าขอบกระจกมีมีสีเขียวมากแสดงว่ามีปริมาณ เหล็กอ๊อกไซด์ มาก

3. ฉนวน เป็นส่วนที่อยู่ด้านล่างและด้านข้างของแผงรับแสง ทำด้วยโฟมหรือใยแก้ว ทำหน้าที่ป้องกันการถ่ายเทความร้อนออกจากแผงรับแสงอาทิตย์ทางด้านล่างและด้านข้าง

ในการออกแบบสร้างตัวรับแสงแผ่นราบนี้ สิ่งที่ควรพิจารณาคือ ช่องว่างระหว่างแผ่นดูดรังสีกับฝาปิดโปร่งใส ทดลองพบว่า ระยะห่างนี้ต้องไม่เกิน 47 เซนติเมตร และไม่ต่ำกว่า 8 เซนติเมตร เพราะจะเกิดเงาจากฝาด้านข้าง แผงรับแสงอาทิตย์แผ่นราบที่ผลิตจำหน่ายในท้องตลาดจะมีประสิทธิภาพตั้งแต่ 50 เปอร์เซ็นต์ ถึง 65 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจะมีประสิทธิภาพไม่สูงนัก เพื่อลดต้นทุนการผลิต

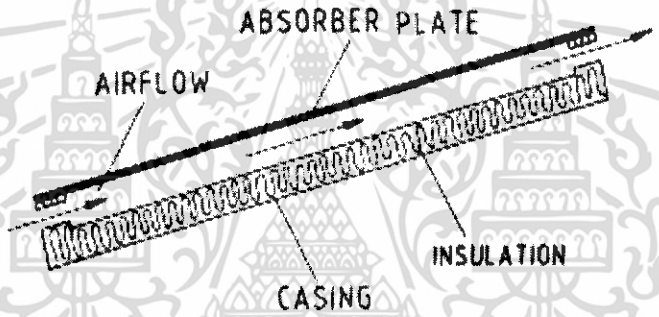
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 แผงรับแสงอาทิตย์ชนิดแผ่นราบ [2]

แผงรับแสงอาทิตย์ที่ทำให้อากาศร้อนสามารถจำแนกได้ 2 ประเภทคือ แผงรับแสงอาทิตย์แบบเปลือย และแผงรับแสงอาทิตย์แบบมีแผ่นปกคลุม

### 2.3.1 แผงรับแสงอาทิตย์ที่ทำให้อากาศร้อนแบบเปลือย

เครื่องทำให้อากาศร้อนโดยใช้แสงอาทิตย์แบบนี้มีส่วนประกอบที่ง่ายไม่ซับซ้อนโดยจะมีช่องให้อากาศไหล โดยแผ่นบนสุดจะเป็นแผ่นที่กักเก็บความร้อนจากแสงอาทิตย์และมีการหุ้มหุ้มฉนวนด้านหลัง ดังรูปที่ 2.1 แผงรับแสงอาทิตย์แบบเปลือยนิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในการอบธัญญพืช (ทั้งระบบแบบธรรมชาติและแบบบังคับ) แผ่นเหล็กที่เป็นลอนที่ใช้มุงหลังคาสิ่งก่อสร้างก็สามารถนำมาใช้เป็นแผงรับความร้อนแบบเปลือยได้ โดยการให้ความร้อนแก่อากาศภายในและโรงเก็บธัญญพืช




**รูปที่ 2.1** แผงรับพลังงานความร้อนแสงอาทิตย์แบบแผ่นเปลือย [2]

แผงรับแสงอาทิตย์เปลือยมาก จะมีการสูญเสียความร้อนผ่านทางพื้นผิวที่เปิดสู่อากาศภายนอก ดังนั้นจึงมีประสิทธิภาพทางความร้อนต่ำ โดยทั่วไปจะใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิของอากาศให้สูงกว่าอุณหภูมิแวดล้อมน้อยกว่า 10 $^{\circ}$C ดังนั้นแผงรับแสงอาทิตย์แบบเปลือยจึงเหมาะสมสำหรับอุณหภูมิที่ไม่สูงนัก แต่ก็มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายเนื่องจากความไม่ซับซ้อนและโครงสร้างที่ราคาถูก

### 2.3.2 แผงรับพลังงานแสงอาทิตย์แบบแผ่นปิด

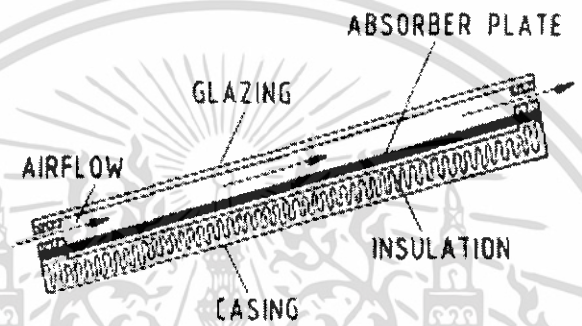
การที่ลดการสูญเสียความร้อนทางด้านบนของแผงรับแสงอาทิตย์ให้น้อยลงกระทำโดยการใช้วัสดุหนึ่งชั้นหรือมากกว่านั้นวางขนานกับแผ่นตัวกักเก็บ โดยทั่วไปวัสดุปิดจะใช้วัสดุจำพวกกระจก และพลาสติกใส โดยจะช่วยป้องกันการสูญเสียการพาความร้อนออกจากแผ่นตัวกักเก็บ ลดการแผ่รังสีของความร้อนที่ความยาวคลื่นสูงและป้องกันแผ่นตัวกักเก็บเย็นตัวลงสูง ส่วนใหญ่เกิดจากฝน ดังนั้นประสิทธิภาพของแผงรับที่มีแผ่นปิดจะสูงกว่าแบบเปลือย อย่างไรราคาจะเพิ่มขึ้นตามโครงสร้างที่ซับซ้อน นอกจากนี้วัสดุที่ใช้ปิดมักจะไม่ค่อยแข็งแรงมีการแตกหักได้ง่าย ค่าใช้จ่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการบำรุงรักษาเพิ่มขึ้น ทำให้เพิ่มการจ่ายการซ่อมแซม แผงรับแสงอาทิตย์ที่ให้ความร้อนอากาศแบบมีวัสดุปกปิดโดยทั่วไปจะใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิของอากาศให้สูงกว่าอุณหภูมิแวดล้อมประมาณ 10 °C ถึง 35°C แผงรับพลังงานความร้อนที่ทำให้อากาศร้อนแบบแผ่นปิด จะสามารถจำแนกตามลักษณะได้ดังต่อไปนี้

**1. แผงรับแสงอาทิตย์ชนิดที่ให้อากาศไหลผ่านด้านหน้าแผ่นกักเก็บ**

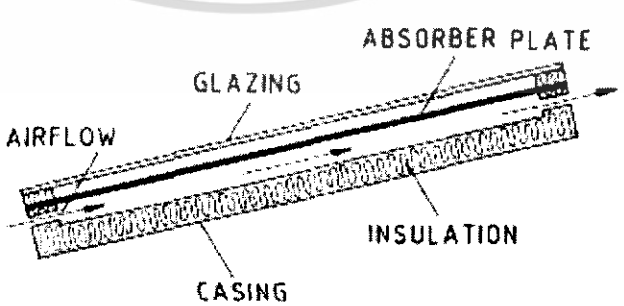
แผงรับพลังงานแสงรับอาทิตย์แบบนี้ อากาศจะไหลผ่านความร้อนตลอดช่องระหว่างแผ่นปิดและแผ่นตัวกักเก็บ (ข้างล่างจะเป็นฉนวน) ดังรูปที่ 2.2 ความร้อนจะไหลผ่านไปสู่อากาศที่ไหลผ่านด้านหน้าของแผ่นตัวกักเก็บ




**รูปที่ 2.2** แผงรับพลังงานแสงอาทิตย์แบบช่องอากาศผ่านด้านหน้าแผ่นตัวกักเก็บ [2]

**2. แผงรับพลังงานแสงอาทิตย์แบบช่องอากาศผ่านด้านหลังของแผ่นกักเก็บ**

แผงรับพลังงานแสงอาทิตย์แบบนี้จะมีแผ่นกักเก็บอยู่ด้านหลังแผ่นปิด โดยจะมีช่องอากาศอยู่ระหว่างแผ่นทั้งสองโดยอากาศที่ถูกทำให้ร้อนไหลระหว่างด้านหลังของแผ่นกักเก็บและชั้นของฉนวน ซึ่งการถ่ายเทความร้อนจะผ่านทางด้านหลังของแผ่นกักเก็บเพราะความร้อนจะไหลผ่านด้านหลังของแผ่นตัวกักเก็บ ดังรูปที่ 2.3 แผงรับพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์แบบช่องอากาศผ่านด้านข้างล่างปกติแล้วจะมีประสิทธิภาพมากกว่าแบบช่องอากาศผ่านด้านหน้าแผ่นแบบช่องอากาศผ่านด้านข้างล่างแผ่นกักเก็บ

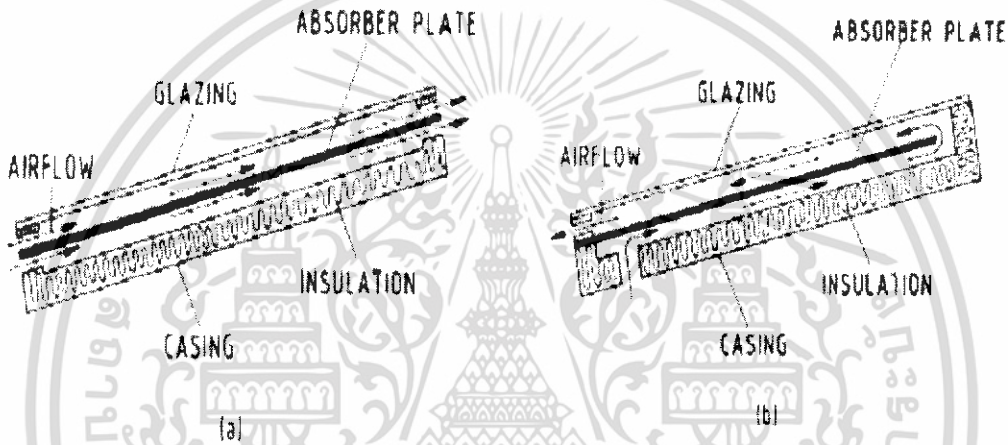



**รูปที่ 2.3** แผงรับพลังงานแสงอาทิตย์แบบช่องอากาศผ่านด้านข้างล่างของแผ่นกักเก็บ [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**3. แผงรับพลังงานแสงอาทิตย์แบบปิดชนิดแผ่นแขวน**

แผ่นตัวกักเก็บแสงจะติดตั้งอยู่ระหว่างวัสดุปิดและอยู่บนชั้นของฉนวน อากาศถูกทำให้ร้อนจะไหลผ่านด้านใดด้านหนึ่งของแผ่นกักเก็บ ทำให้มีการเพิ่มพื้นที่ในการถ่ายเทความร้อน แผ่นตัวกักเก็บนี้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าจะทำให้เกิดการการแผ่รังสีน้อยลงด้วย ดังรูปที่ 2.4a และอากาศร้อนที่ไหลผ่านอากาศเข้าทั้ง 2 ทาง ดังในรูปที่ 2.4b โดยทั่วไปของแผ่นแบบแขวนจะมีอยู่ 2 แบบคือ ไหลแบบขนาน และไหลแบบสองเที่ยว (ไปและกลับ) แบบสามเที่ยวก็มีแต่ไม่เป็นที่นิยม แผ่นกักเก็บพลังงานความร้อนที่เป็นแบบแขวนจะมีประสิทธิภาพมากกว่าแบบแผ่นปิดแบบไหลผ่านด้านหน้าและแบบไหลผ่านด้านหลัง สามารถให้ประสิทธิภาพสูงถึง 65%




**รูปที่ 2.4** แผงรับพลังงานแสงอาทิตย์แบบปิดชนิดแผ่นแขวน (a) ทิศทางขนานกัน (b) แบบสองเที่ยว (ไปและกลับ) [2]

## 2.4 สรุปการออกแบบแผงรับแสงอาทิตย์

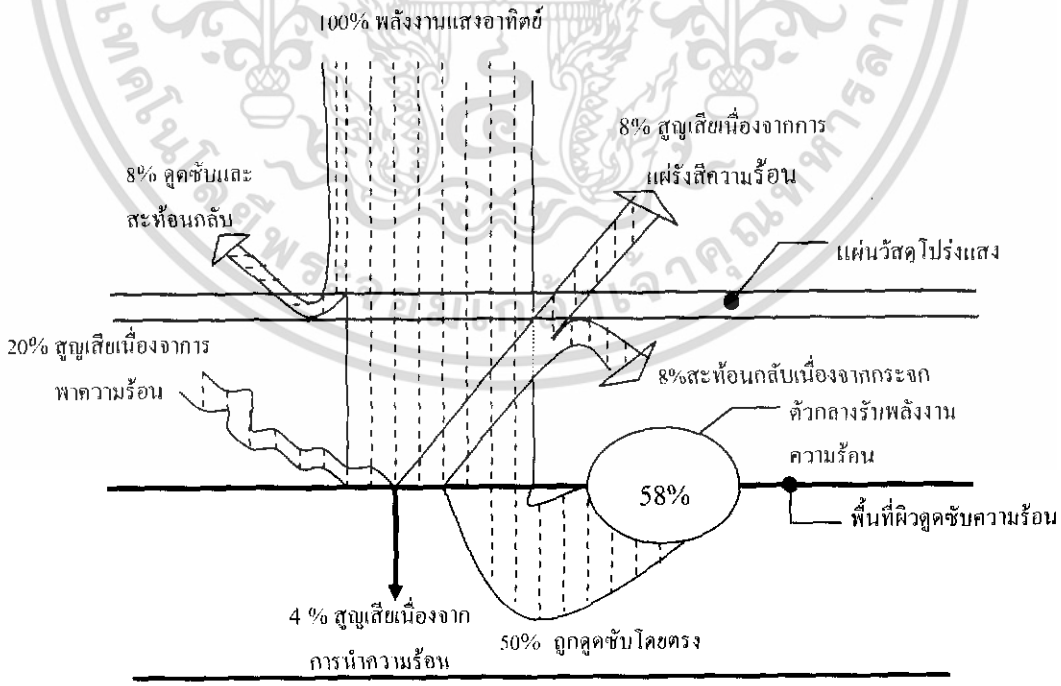
สำหรับเครื่องอบแห้งโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ชนิดอุณหภูมิไม่มาก (อุณหภูมิสูงขึ้นจากเดิมไม่เกิน 40°C) สามารถใช้วัสดุกระจกเพียงชั้นเดียวก็เหมาะสมสำหรับแผงรับพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้ลมร้อนและเมื่อต้องการอุณหภูมิที่สูงขึ้นอาจใช้กระจกสองชั้นหรือสามชั้นมากั้นจะสามารถช่วยลดการสูญเสียความร้อน แต่อย่างไรก็ตามการที่อุณหภูมิสูงขึ้นจำเป็นต้องมีการเพิ่มฉนวนป้องกันการสูญเสียความร้อนมากขึ้นในแผงรับแสงอาทิตย์แบบเปลือยหรือแผงรับแบบปิดชั้นเดียววัสดุโครงสร้าง เช่น กระจกสองชั้นหรือสามชั้นนั้นจะต้องเพิ่มค่าใช้จ่ายในการออกแบบเครื่องแผงรับแสงอาทิตย์ แต่อย่างไรก็ตามกระจกก็มีความจำเป็นมาก เพราะว่ามีปริมาณความร้อนที่สูญเสียในแผงรับแสงอาทิตย์แบบเปลือยมีจำนวนมาก (อุณหภูมิจะสูงขึ้นกว่าเดิมน้อยกว่า 10°C ) และต้องใช้ความเร็วลมสูง (ประมาณ 5 เมตร/วินาที) ขอบเขตที่มีอยู่จำกัดด้วยการใช้พัดลม ดังนั้นการจะทำแผงรับพลังงานแสงอาทิตย์แบบเปลือยจึงไม่เหมาะสมสำหรับเครื่องอบแห้งที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับความร้อนที่สูงขึ้นจำเป็นต้องลดการสูญเสียความร้อนจากแผงตัวกักเก็บ ซึ่งจำเป็นต้องใช้กระจก โดยปกติแล้วสำหรับอุณหภูมิที่สูงขึ้นประมาณ 10°C – 35°C จะใช้แผงรับแสงอาทิตย์แบบกระจกจกชั้นเดียว ซึ่งมีผลที่ดีมากกว่าที่ใช้กระจกสองชั้นหรือสามชั้น ดังนั้นแผงรับพลังงานแสงอาทิตย์แบบกระจกจกชั้นเดียวจะมีความเหมาะสมมากกว่าสำหรับการประยุกต์ใช้เครื่องอบแห้งที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์

## 2.5 ส่วนต่างๆ ของพลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบแผงรับแสงอาทิตย์ [3]

แผงรับแสงอาทิตย์เมื่อได้รับพลังงานจากแสงอาทิตย์ส่องกระทบแผงรับแสงอาทิตย์ที่ปิดด้วยแผ่นวัสดุโปร่งใส เช่น แผ่นกระจกหรือพลาสติก ปริมาณความร้อนประมาณ 8 เปอร์เซ็นต์ จะถูกแผ่นวัสดุโปร่งใสดูดซับและสะท้อนกลับ ที่เหลือนอกนั้นประมาณ 92 เปอร์เซ็นต์ จะถูกส่งผ่านไปยังพื้นผิวดูดซับพลังงานพลังงานความร้อนประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ จะสูญเสียไปจากการพาความร้อนของอากาศที่คั่นระหว่างแผ่นวัสดุโปร่งใสกับพื้นที่ผิวดูดซับ พลังงานอีก 16 เปอร์เซ็นต์ จะสูญเสียไปจากการแผ่รังสีของพื้นผิว แต่จะได้กลับคืนมา 8 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากการสะท้อนกลับที่แผ่นวัสดุโปร่งใส และพลังงาน 4 เปอร์เซ็นต์ จะสูญเสียไปจากการนำความร้อนจากพื้นผิวดูดซับพลังงาน สรุปแล้วจะได้พลังงานพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์มาใช้ประมาณ 58 เปอร์เซ็นต์ คือ 50 เปอร์เซ็นต์ จากการที่ตัวกลางสะสมพลังงานความร้อนดูดมาโดยตรง และอีก 8 เปอร์เซ็นต์ จากการสะท้อนกลับที่แผ่นวัสดุโปร่งใส




**รูปที่ 2.5** ส่วนต่างๆ ของพลังแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบแผงรับแสงอาทิตย์ [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.5.1 การเพิ่มประสิทธิภาพให้กับแผงรับแสงอาทิตย์แผ่นราบ [2]

ในการศึกษาการสูญเสียความร้อนของแผงรับแสงอาทิตย์แบบแผ่นราบทั่วไปนั้น พบว่าการสูญเสียความร้อนสามารถเกิดขึ้นได้หลายๆ จุดด้วยกัน ซึ่งประกอบด้วยการสูญเสียความร้อนเนื่องจากการพาความร้อนและแผ่รังสีความร้อนออกจากด้านบน ด้านล่างและด้านข้างของแผงรับแสงอาทิตย์ การที่จะเพิ่มประสิทธิภาพของแผงรับแสงอาทิตย์ให้ได้สูงขึ้น จะต้องทราบการสูญเสียพลังงานความร้อนในส่วนต่างๆ ของแผงรับแสงอาทิตย์ โดยมีรายละเอียดดังตารางที่ 2.1

**ตารางที่ 2.1** การสูญเสียความร้อนของแผงรับแสงอาทิตย์แผ่นราบทั่วๆไป [2]

| ชนิดของการสูญเสีย | ร้อยละ |
|---|---|
| ที่ขอบ | 1-3 |
| ด้านหลัง | 5-10 |
| การแผ่รังสี | 5-7 |
| การพาความร้อน | 22-30 |

ดังนั้นถ้าต้องการเพิ่มประสิทธิภาพของแผงรับแสงอาทิตย์ ก็ต้องพยายามลดการสูญเสียความร้อน ดังนี้

1. เพิ่มค่าการส่งผ่านรังสีของฝาปิดโปรงใส โดยใช้แผ่นกระจกที่มีปริมาณเหล็กอ๊อกไซด์ต่ำ หรือใช้พลาสติกสังเคราะห์

2. ทำให้มีช่องว่างภายในตัวรับแสงเป็นสุญญากาศ

3. กรณีที่ใช้น้ำเป็นของไหลทำงานใช้ผนังแบบรวงผึ้งวางในช่องว่างระหว่างฝาปิดกับแผ่นกักเก็บรังสี ทำให้อากาศนิ่ง ป้องกันการสูญเสียความร้อนจากการพาความร้อน

4. ลดการสูญเสียความร้อนจากการแผ่รังสี โดยการเลือกใช้สารที่เคลือบผิวแผ่นดูดรังสีเพื่อให้มีสภาพการแผ่รังสีอินฟราเรดต่ำ และมีสภาพการดูดรังสีในช่วงคลื่นสูง ปัจจุบันจะเคลือบแผ่นรับรังสีด้วยแบล็คโคลม ซึ่งมีสภาพการดูดกลืนรังสี เท่ากับ 0.92-0.94 และสภาพการส่งออกรังสี เท่ากับ 0.08-0.10 ซึ่งนำมาใช้ในอุตสาหกรรมได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.6 ทฤษฎีการหาค่าประสิทธิภาพของแผงรับแสงอาทิตย์แบบแผ่นราบ [4]

ในการส่งผ่าน พลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ มายังแผงรับแสงอาทิตย์ จะอาศัยการถ่ายเทความร้อนแบบการแผ่รังสีความร้อนและการพาความร้อน แผ่นรับแสงอาทิตย์แบบแผ่นราบ ซึ่งมีฝาปิดเป็นกระจกหนึ่งชั้น ในส่วนของกระจกจะมีค่าการทะลุผ่านรังสี($\tau$)และค่าการดูดกลืนรังสีของกระจก ($\alpha$) โดยอากาศจะไหลผ่านเข้าด้านล่าง และไหลย้อนกลับผ่านทางด้านบนของแผง ซึ่งเป็นชนิดเดียวกับที่ใช้ในโครงงานนี้ การดุลพลังงานความร้อนของแผงรับแสงอาทิตย์สามารถแสดงได้ดังสมการ 2.1 โดยที่ $Q_h$ เป็นค่าพลังงานความร้อนของแผงให้ความร้อน ซึ่งพลังงานความร้อนจะมีการสูญเสียออกจากด้านบน ($Q_{Lt}$) และด้านล่าง ($Q_{Lb}$) ของแผงรับ รวมทั้งพลังงานความร้อนที่ถ่ายเทให้ให้กับอากาศ ($Q_u$) ที่ไหลผ่านเข้ามาสัมผัสกับตัวแผ่นรับรังสี โดยจะมีพลังงานบางส่วนสะสมในระบบ ($Q_S$)

$$Q_h(\tau\alpha) = Q_u + Q_L + Q_S \tag{2.1}$$

เนื่องจากพลังงานความร้อนที่ได้จากดวงอาทิตย์ในแต่ละวันให้ค่าความร้อนไม่สม่ำเสมอกันในแต่ละรอบวัน การทดสอบหาประสิทธิภาพของแผงรับแสงอาทิตย์ในโครงงานนี้จึงใช้แหล่งให้พลังงานความร้อนจากแผงให้ความร้อนแทนพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ พลังงานที่ได้จากแผงให้ความร้อนจะถ่ายเทความร้อนมายังแผงรับแสงอาทิตย์ในรูปของการแผ่รังสีความร้อนและการพาความความร้อน สามารถอธิบายดังสมการ 2.2-2.5

$$Q_h = h_h A_h (T_h - T_a) + A_h \varepsilon_h \sigma F (T_h^4 - T_a^4) \tag{2.2}$$

$$h_h = \frac{N_{UL} k}{L} \tag{2.3}$$

$$N_{UL} = 0.644 (N_{Re})^{1/2} (N_{Pr})^{1/3} \tag{2.4}$$

$$F_{ij} = \frac{2}{\pi XY}\left\{ \ln\left[\frac{(1+X^2)(1+Y^2)}{1+X^2+Y^2}\right]^{1/2} + X(1+Y^2)^{1/2}\tan^{-1}\frac{X}{(1+Y^2)^{1/2}} + Y(1+X^2)^{1/2}\tan^{-1}\frac{Y}{(1+X^2)^{1/2}} - X\tan^{-1}X - Y\tan^{-1}Y \right\} \tag{2.5}$$

เมื่อ $h_h$ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนนื่องจากลมที่แผงให้ความร้อน (วัตต์/ตารางเมตร.องศาเคลวิน)

$A_h$ พื้นที่ของแผงให้ความร้อน (ตารางเมตร)

$T_h$ อุณหภูมิของผิวแผงให้ความร้อน (องศาเคลวิน)

$F_{ij}$ แฟคเตอร์รูปร่างของการวางแผงให้ความร้อนกรณีที่แผงให้ความร้อน(i)วางขนานกับแผงรับความร้อน(j)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

X ความยาวของแผงรับแสงอาทิตย์ต่อความสูงของแผงให้ความร้อน(L/R)

Y ความกว้างของแผงรับแสงอาทิตย์ต่อความสูงของแผงให้ความร้อน(W/R)

$\varepsilon_h$ ค่าการส่งออกรังสีความร้อนของแผงให้ความร้อน

$\sigma$ ค่าคงที่ Boltzmann มีค่าเท่ากับ $5.676\times10^{-8}$ (วัตต์/(เมตร)$^2$(องศาเคลวิน)$^4$)

k สภาพการนำความร้อนของอากาศ (วัตต์/เมตร.องศาเคลวิน)

L ความยาวของแผงรับแสงอาทิตย์ (เมตร)

W ความกว้างของแผงรับแสงอาทิตย์(เมตร)

R ความสูงของแผงให้ความร้อน(เมตร)

$N_{Pr}$ Prandtl number โดยหาจาก $Cp\mu/k$

$N_{Re}$ Reynolds number โดยหาจาก $LV\rho/\mu$

Cp ความจุความร้อนจำเพาะของของไหล (จูล/กิโลกรัม-เคลวิน)

V ความเร็วลม(เมตร/วินาที)

$\mu$ ความหนืดของอากาศ(กิโลกรัม/เมตร.วินาที)

**2.6.1 การคำนวณอัตราการสูญเสียพลังงานความร้อนจากแผงรับแสงอาทิตย์**

พลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์เมื่อส่งผ่านความร้อนมายังแผงรับแสงอาทิตย์จะมีการสูญเสียพลังงานความร้อน ($Q_L$) จากทางด้านบนของแผงรับแสงอาทิตย์และด้านล่างของแผงรับแสงอาทิตย์ สมการสำหรับคำนวณอัตราการสูญเสียพลังงานความร้อนจากแผงรับแสงอาทิตย์สามารถอธิบายได้ดังสมการ 2.6

$$Q_L = Q_{Lt} + Q_{Lb} \qquad (2.6)$$

เมื่อ $Q_{Lt}$ พลังงานความร้อนที่สูญเสียทางด้านบนของแผงรับแสงอาทิตย์ (วัตต์)

$Q_{Lb}$ พลังงานความร้อนที่สูญเสียทางด้านล่างของแผงรับแสงอาทิตย์ (วัตต์)

**1. การหา $Q_{Lt}$** ในการสูญเสียพลังงานความร้อนทางด้านบนของแผงรับแสงอาทิตย์เกิดจาก การสูญเสียพลังงานความร้อนโดยการพาและการแผ่รังสีความร้อนจากกระจกออกสู่บรรยากาศ โดยรอบรังสีทำให้ มีการสูญเสียพลังงานความร้อนโดยการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนจากผิวรับรังสีสู่อากาศ ทางด้านบนของแผ่นรับรังสีจะไม่นำมาคำนวณเป็นพลังงานความร้อนที่สูญเสียทางด้านบน เนื่องจากพลังงานส่วนนี้จะถูกถ่ายเทให้กับอากาศเหนือผิวรับรังสีเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป การสูญเสียพลังงานความร้อนทางด้านบนของแผงรับแสงอาทิตย์เขียนได้เป็นดังสมการ 2.7 – 2.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Q_{La} = h_w A_c (T_w - T_a) + A_c \varepsilon_w \sigma (T^4_w - T^4_a) \quad (2.7)$$

$$h_w = \frac{N_{UL} k}{L} \quad (2.8)$$

$$N_{UL} = 0.644 (N_{Re})^{1/2} (N_{Pr})^{1/3} \quad (2.9)$$

เมื่อ $h_w$ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเนื่องจากลม (วัตต์/ตารางเมตร.องศาเคลวิน)

$A_c$ พื้นที่ของแผงรับแสงอาทิตย์ (ตารางเมตร)

$T_w$ อุณหภูมิของผิวกระจก (องศาเคลวิน)

$T_a$ อุณหภูมิของอากาศรอบแผงรับแสงอาทิตย์ (องศาเคลวิล)

$\varepsilon_w$ ค่าการส่งออกรังสีความร้อนของกระจก

หมายเหตุ สมการ (2.9,2.4) ใช้ได้สำหรับแผงรับแสงอาทิตย์ที่มีมุมเอียงอยู่ในช่วง 0-20 องศา และความเร็วลมที่พัดผ่านเหนือระนาบแผงมีค่าไม่เกิน 3 เมตร/วินาที ช่วงการไหลของอากาศในช่วงที่เป็นแบบราบเรียบคือในช่วงน้อยกว่า $5 \times 10^5$

**2. การหา $Q_{Lb}$** ในการสูญเสียพลังงานความร้อนของชั้นล่างของแผงรับแสงอาทิตย์เกิดจากการสูญเสียพลังงานความร้อนจากการนำความร้อนผ่านทางฉนวน การพาและการแผ่รังสีความร้อนจากด้านล่างของแผงรับแสงอาทิตย์ออกสู่บรรยากาศโดยรอบ ส่วนพลังงานความร้อนที่สูญเสียโดยการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนจากผิวรับรังสีสู่อากาศทางด้านล่างของผิวรับรังสีจะไม่นำมาคำนวณเป็นการสูญเสียความร้อนทางด้านล่าง เนื่องจากพลังงานส่วนนี้จะถูกถ่ายเทให้กับอากาศใต้ผิวรับรังสี ดังนั้น สมการที่ใช้ในการคำนวณการสูญเสียความร้อนทางด้านล่างของแผงสามารถอธิบายได้ดังสัมการ 2.10

$$Q_{Lb} = \frac{K_Y A_b (T_A - T_Y)}{X} \quad (2.10)$$

เมื่อ $K_Y$ สภาพนำความร้อนของฉนวน (วัตต์/เมตร-องศาเคลวิน)

$X$ ความหนาของฉนวน(เมตร)

$T_A$ อุณหภูมิของแผ่นอลูมิเนียมชั้นล่างของแผง(องศาเคลวิน)

$T_Y$ อุณหภูมิของฉนวน(องศาเคลวิน)

$A_b$ พื้นที่ผิวด้านล่างของแผงรับแสงอาทิตย์ (ตารางเมตร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**2.6.2 การคำนวณอัตราการส่งผ่านความร้อนไปสู่อากาศ**

อัตรการส่งผ่านความร้อนที่ถ่ายเทให้กับอากาศในแผงรับแสงอาทิตย์ เมื่ออากาศที่ถูกทำให้ไหลผ่านเข้ามาในแผงรับแสงอาทิตย์แผ่นรับความร้อนทางด้านล่างจะถ่ายเทความร้อนให้กับอากาศที่ไหลเข้ามา จากนั้นอากาศจะถูกทำให้ร้อนขึ้นอีก เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนของแผ่นรับความร้อนทางด้านบนให้กับอากาศที่ไหลวนขึ้นจากด้านล่างของแผ่นสัมผัสแผ่นรับรังสีความร้อนอีกครั้ง สมการคำนวณหาอัตราการส่งผ่านความร้อนไปสู่อากาศสามารถหาได้จากสมการที่ 2.1 ซึ่งสามารถจัดรูปใหม่ได้ดังสมการ

$$Q_u = Q_h(\tau\alpha) - Q_L - Q_S \tag{2.11}$$

**2.6.3 การคำนวณอุณหภูมิที่ออกจากแผงรับแสงอาทิตย์**

แผงรับแสงอาทิตย์เมื่อได้รับความร้อนจากพลังงานความร้อนจะถูกกักเก็บความร้อนไว้ที่แผ่นรับความร้อนเมื่ออากาศภายนอกแผงรับแสงอาทิตย์ถูกทำให้ไหลเข้ามาที่อุณหภูมิภายนอก เมื่ออากาศที่ไหลเข้ามาสัมผัสกับแผ่นรับรังสีที่ร้อน จะทำให้อุณภูมิของอากาศร้อนขึ้น สามารถคำนวณหาสมการอุณหภูมิที่ออกจากแผงรับแสงอาทิตย์ดังสมการ 2.12

$$Q_u = mC_{P,avg}(T_{out} - T_{in}) \tag{2.12}$$

$$m = \rho V_b A_g \tag{2.13}$$

ดังนั้น

$$T_{out} = \frac{Q_u}{mC_{P,avg}} + T_{in} \tag{2.14}$$

เมื่อ

| | |
|---|---|
| m | อัตราการไหลโดยมวลของอากาศที่เข้าสู่แผงรับแสงอาทิตย์ (กิโลกรัม/วินาที) |
| $C_{p,avg}$ | ความจุความร้อนจำเพาะเฉลี่ยของอากาศภายในแผงรับแสงอาทิตย์ (จูล/กิโลกรัม- องศาเคลวิน) |
| $T_{out}$ | อุณหภูมิของอากาศที่ออกจากแผงรับแสงอาทิตย์ (องศาเคลวิน) |
| $T_{in}$ | อุณหภูมิของอากาศที่เข้าสู่แผงรับแสงอาทิตย์ (องศาเคลวิน) |
| $A_g$ | พื้นที่หน้าตัดที่อากาศไหลเข้าสู่แผ่นรับแสงอาทิตย์ (ตารางกิโลเมตร) |
| ρ | ความหนาแน่นของอากาศที่เข้าสู่แผงรับแสงอาทิตย์ (กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร) |
| $V_b$ | ความเร็วของอากาศที่ไหลเข้าสู่แผงรับแสงอาทิตย์ (เมตร/วินาที) |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**2.6.4 การคำนวณประสิทธิภาพของแผงรับแสงอาทิตย์**

ประสิทธิภาพของแผงรับแสงอาทิตย์ หมายถึง อัตราส่วนของพลังงานความร้อนที่ถ่ายเทความร้อนให้อากาศในแผงรับแสงอาทิตย์ต่อพลังงานจากดวงอาทิตย์ที่ใช้กับแผงรับแสงอาทิตย์หรือพลังงานความร้อนจากแผงให้ความร้อน สามารถคำนวณได้ดังสมการ 2.15 หรือ 2.16

$$\eta_t = \frac{Q_u \times 100}{Q_h} \qquad (2.15)$$

หรือ

$$\eta_t = \frac{m\, C_{P,avg} \left(T_{out} - T_{in}\right) \times 100}{Q_h}$$

โดยที่ประสิทธิภาพทางทฤษฎีคำนวณจากสมการที่ 2.15 ใช้ $T_{out}$ จากสมการ 2.14 ส่วนประสิทธิภาพที่แท้จริงคำนวณได้จากสมการ 2.16 ใช้ $T_{out}$ จากการทดลองจริง

## 2.7 กระบวนการอบแห้ง[5]

การอบแห้ง คือ กระบวนการที่ความร้อนถูกถ่ายเทด้วยวิธีใดวิธีหนึ่งไปยังวัสดุที่มีความชื้นเพื่อไล่ความชื้นออกโดยการระเหย สิ่งสำคัญในการอบแห้ง คือ การถ่ายเทความร้อนไปยังวัสดุอบแห้งอย่างมีประสิทธิภาพ

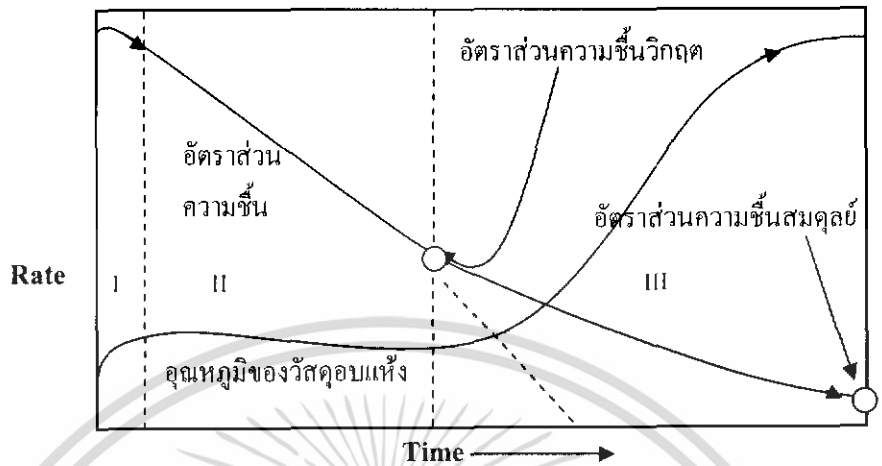
โดยทั่วไปแล้ว ปริมาณของน้ำที่มีอยู่ในวัสดุอบแห้ง มักจะถูกนิยามในรูปของอัตราส่วนของน้ำต่อมวลทั้งหมด นั่นคือ ใช้มวลของวัสดุชื้นเป็นมาตรฐานของการคำนวณความชื้น แต่ในกระบวนการอบแห้งมวลของวัสดุชื้นจะเปลี่ยนค่าตลอดเวลา ดังนั้นจะใช้มวลของวัสดุแห้งเป็นเป็นมาตรฐานการคำนวณความชื้นแทนซึ่งสามารถหาค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นได้ดังสมการ 2.13 ดังนี้

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความชื้นของวัสดุอบแห้ง} = \frac{\text{น้ำหนักเปียก} - \text{น้ำหนักแห้ง}}{\text{น้ำหนักแห้ง}} \times 100 \qquad (2.13)$$

การอบเมล็ดพืชโดยส่วนมากการอบแห้งจะอยู่ในช่วงอัตราการอบแห้งลดลงเท่านั้น เมื่อถูกทำให้แห้งในลักษณะชั้นบางที่สภาวะอากาศคงที่ (อุณหภูมิ ความชื้น และความเร็วของอากาศ) กระบวนการอบแห้งสามารถแบ่งอัตราการอบแห้งเป็น 2 ช่วง คือช่วงอัตราการอบแห้งคงที่และอัตราการอบแห้งลดลง ที่ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ความชื้นของวัสดุมีค่าสูงกว่าความชื้นวิกฤตที่ผิวของวัสดุจะมีน้ำเกาะอยู่เป็นจำนวนมาก เมื่อผ่านกระแสอากาศไปบนตัววัสดุ ความร้อนสัมผัสจากอากาศจะถ่ายเทไปผิววัสดุ และน้ำจะระเหยจากผิววัสดุไปผิวอากาศ การถ่ายเทความร้อนและมวลจะเกิดขึ้นเฉพาะที่ผิวของวัสดุเท่านั้น โดยที่ช่วงอัตราการอบแห้งลดลงความชื้นของวัสดุจะมีค่ากว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความชื้นวิกฤต น้ำจะเคลื่อนที่จากภายในตัววัสดุมาที่ผิวของวัสดุในลักษณะของเหลวหรือไอน้ำและน้ำที่ผิวจึงจะระเหยไปยังอากาศ ซึ่งสามารถอธิบาย จาก Drying Curve ได้ดังรูปที่ 2.6




**รูปที่ 2.6** การอบแห้งกับเวลา [5]

จากรูปจะเห็นได้ว่า การอบแห้งแบ่งได้เป็น 3 ช่วงใหญ่ๆ ดังต่อไปนี้

I : ช่วงการให้ความร้อนเบื้องต้นแก่วัสดุอบ

II : ช่วงการอบแห้งที่อัตราเร็วคงที่

III : ช่วงการอบแห้งที่อัตราเร็วลดลง

โดยทั่วไปวัสดุที่นำมาอบแห้ง ที่ผิวของวัสดุเปียกชื้นความชื้นที่ผิวจะอยู่ในรูปของน้ำ ถ้าเอาวัสดุนี้มาอบแห้งภายใต้เงื่อนไขที่คงที่ อุณหภูมิของวัสดุจะมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิกระเปราะเปียกของกระแสลมร้อน ช่วงเวลาที่วัสดุใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิจนถึงค่านี้ คือ ช่วงที่ I ในช่วงเวลาที่ II อุณหภูมิของวัสดุจะมีค่าคงที่ประมาณอุณหภูมิกระเปราะเปียก ตราบใดที่ยังมีความชื้นเหลืออยู่ในรูปของน้ำที่ผิววัสดุ ความร้อนทั้งหมดของวัสดุได้รับในช่วงนี้จะถูกใช้ในการระเหยความชื้นเท่านั้น ดังจะเห็นได้ในรูป อัตราส่วนส่วนความชื้นเฉลี่ยของวัสดุจะลดลงเป็นสัดส่วนกับเวลาในช่วงเวลา II นี้ดังนั้นความเร็วของการระเหยจะมีค่าคงที่ในช่วงเวลา III ความชื้นที่อยู่ในรูปของน้ำที่ผิวของวัสดุจะระเหยหมดไป เพราะการถ่ายเทความชื้นในรูปของน้ำจากส่วนในของวัสดุเกิดไม่ทันกับการระเหยของน้ำออกจากผิววัสดุ ดังนั้นผิวของวัสดุจะอยู่ในสภาพที่แห้งและอุณหภูมิของวัสดุจะเริ่มสูงขึ้น สรุปแล้วความเร็วของการอบแห้งจะค่อยๆลดลง เนื่องจากปริมาณความร้อนที่วัสดุได้รับลดลง นอกจากนี้ยังต้องใช้ความร้อนส่วนนี้ในการระเหยความชื้นและเพิ่มอุณหภูมิของวัสดุอีกด้วย การอบแห้งสิ้นสุดลงเมื่ออัตราส่วนความชื้นลดลงถึงค่าอัตราส่วนความชื้นสมดุล ค่าของอัตราส่วนความชื้นเฉลี่ยที่จุดต่อระหว่างช่วง II และ III คืออัตราส่วนความชื้นวิกฤต ในกรณีของวัสดุที่ช่วง II และ III มีเวลานานมากจะไม่คำนึงถึงช่วง I ก็ได้ อนึ่งในกรณีของวัสดุที่มีลักษณะเฉพาะบางชนิดอาจไม่มีช่วง II เลยก็ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 3
# การสร้างและการออกแบบ

การสร้างและการออกแบบเครื่องเก็บความร้อนจากแสงอาทิตย์สำหรับการอบแห้งธัญญพืช ประกอบด้วยอุปกรณ์ส่วนสำคัญ 5 ส่วน ได้แก่ แผงรับแสงอาทิตย์ คอลัมน์อบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด ไซโคลนพัดลมดูดอากาศและระบบต่อเชื่อมอุปกรณ์ ในแต่ส่วนมีรายละเอียดดังนี้

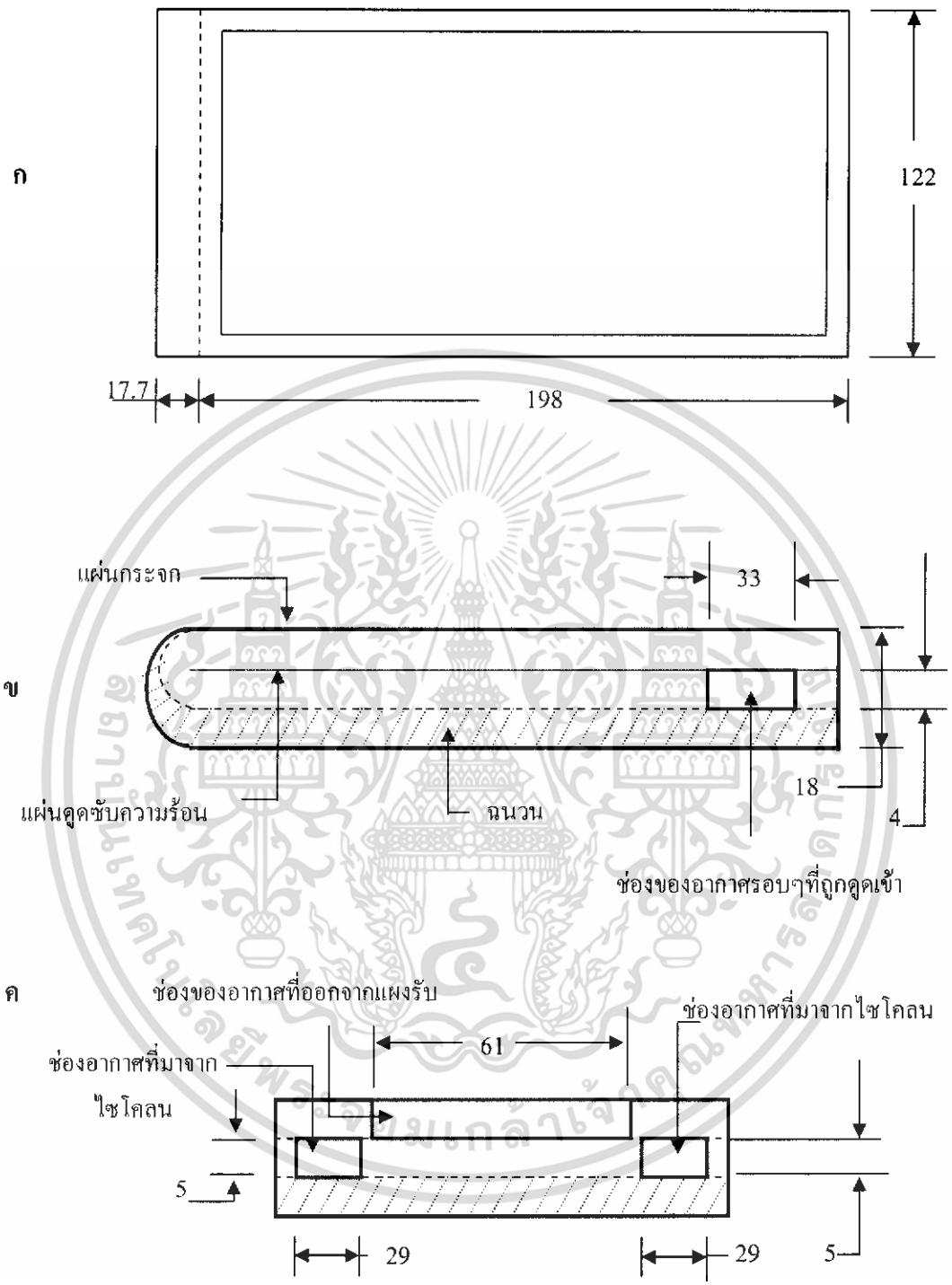
## 3.1 แผงรับพลังงานแสงอาทิตย์

อุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างแผงรับแสงอาทิตย์

1. แผ่นอลูมิเนียมหนา 2 มิลลิเมตร
2. แผ่นอลูมิเนียมหนา 1 มิลลิเมตร
3. เหล็กฉาก 2 เส้น
4. เหล็กแบน 2 เส้น
5. เหล็กกล่อง 4 เส้น
6. แผ่นกระจกขนาด 122 เซนติเมตร ยาว 198 เซนติเมตร
7. สีดำด้าน

ส่วนประกอบแผงรับแสงอาทิตย์ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.1 โดยรูป ก. แสดงภาพทางด้านบนของแผงรับแสงอาทิตย์ ขนาดของแผงรับอาทิตย์ขนาด 122 x 198 x 18 เซนติเมตร ด้านบนของแผงปิดคลุมด้วยกระจกขนาด 122 x 198 x 0.02 เซนติเมตร รูป ข.แสดงภาพทางด้านข้างของแผงรับแสงอาทิตย์ โดยเจาะช่องขนาด 4 x 33 เซนติเมตร มีไว้สำหรับให้อากาศรอบๆเข้าไปในแผงรับแสงอาทิตย์ ด้านล่างของแผงรับแสงอาทิตย์หุ้มด้วยฉนวนใยแก้วขนาด 122 x 198 x 8 เซนติเมตร รูป ค.แสดงภาพทางด้านหลังของแผงรับแสงอาทิตย์ ถูกเจาะช่องขนาด 5 x 61 เซนติเมตร เพื่อให้อากาศร้อนออกจากแผงรับแสงอาทิตย์ และเจาะช่องขนาด 5 x 29 เซนติเมตร เพื่อรับอากาศที่มาจากไซโคลน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**รูปที่ 3.1** แผงรับพลังงานแสงอาทิตย์ ก. ภาพแผงรับแสงอาทิตย์มองจากด้านบน ข. ภาพแผงรับแสงอาทิตย์มองจากด้านข้าง ค. ภาพแผงรับแสงอาทิตย์มองจากด้านหลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
73351

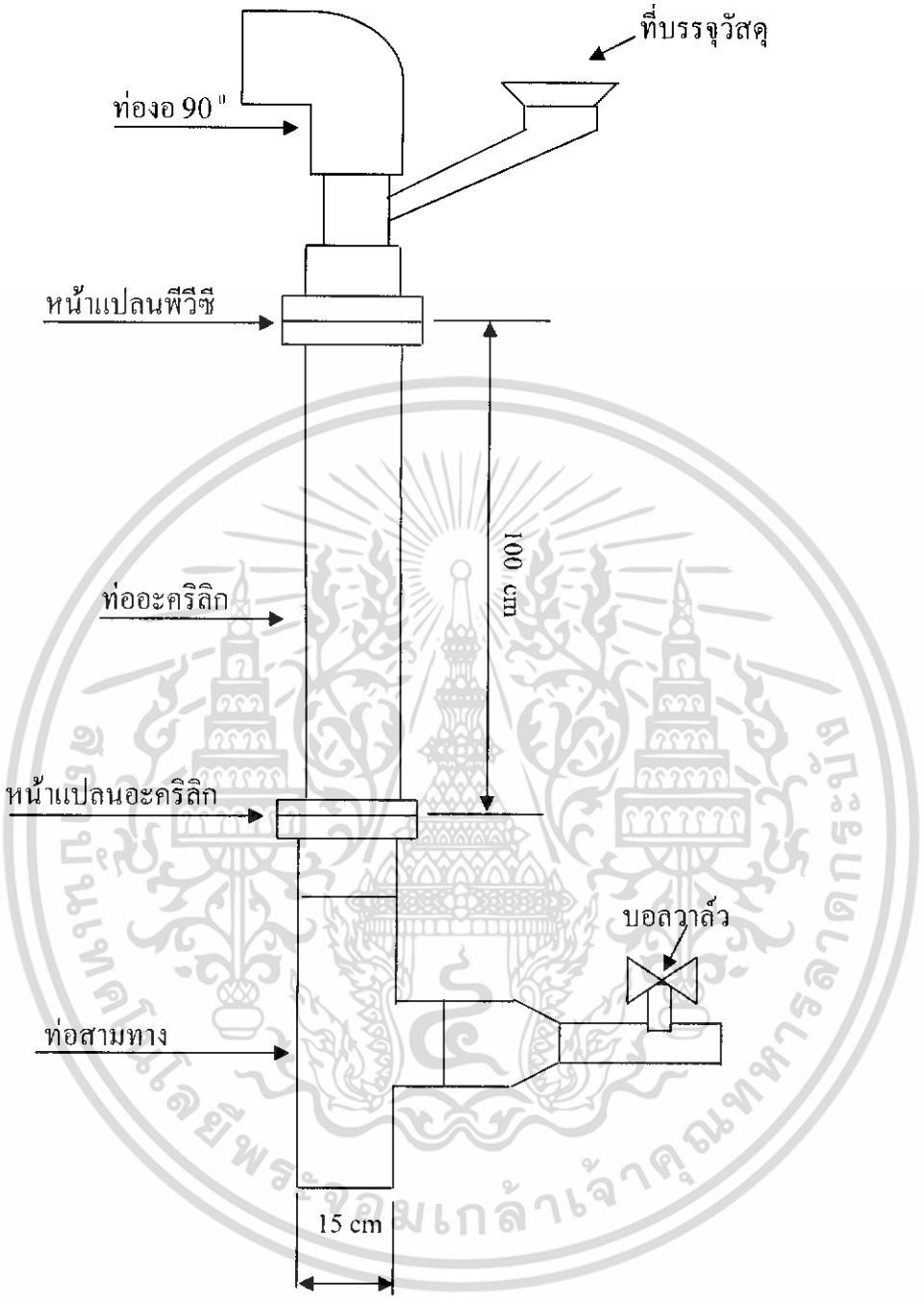
## 3.2 คอลัมน์อบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด

อุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างคอลัมน์อบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด

1. ท่ออะคริลิกใส เส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร ยาว 100 เซนติเมตร
2. ท่อพีวีซีเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร ยาว 50 เซนติเมตร
3. หน้าแปลนอะคริลิกเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร 2 อัน
4. หน้าแปลนพีวีซีเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร 2 อัน
5. ท่อสามทางลดขนาดจากเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร 1 อัน
6. ข้องอ 90 องศา เส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร 1 อัน
7. บอลวาล์ว ขนาด 4 นิ้ว 1 อัน
8. ท่อลดขนาดจากเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร ลดไปเป็นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 เซนติเมตร

คอลัมน์แบบฟลูอิดไดซ์เบด สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.2 โดยมีรายละเอียดดังนี้ ในการประกอบคอลัมน์อบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด ใช้ท่ออะคริลิกใสเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร ความยาว 100 เซนติเมตร เป็นคอลัมน์เพื่อในการมองเห็นวัสดุที่อยู่ภายในคอลัมน์ สามารถศึกษาการทำงานการอบแห้ง ท่ออะคริลิกต่อเชื่อมกับหน้าแปลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร ทั้ง 2 ด้าน ด้านบนท่ออะคริลิกต่อกับท่องอ 90 องศาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร และด้านล่างต่อกับท่อสามทางขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร และท่อลดขนาดที่มีบอลวาล์วขนาด 4 นิ้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**รูปที่ 3.2** คอลัมน์อบแห้งฟลูอิดไดซ์เบด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 3.3 เครื่องไซโคลน [6]

ไซโคลนเป็นเครื่องมือสำหรับแยกอนุภาคออกจากอากาศ โดยใช้แรงหนีศูนย์กลาง ซึ่งเกิดจากการทำให้กระแสอากาศหมุนวน (vortex) จึงสามารถแยกอนุภาคออกจากอากาศได้ การเกิดกระแสวนทำได้โดยการให้อากาศไหลเข้าสู่ไซโคลนในแนวสัมผัส หรือแนวแกนโดยผ่านช่องทางออกของลมด้านบน

**กลไกในการจับอนุภาค**

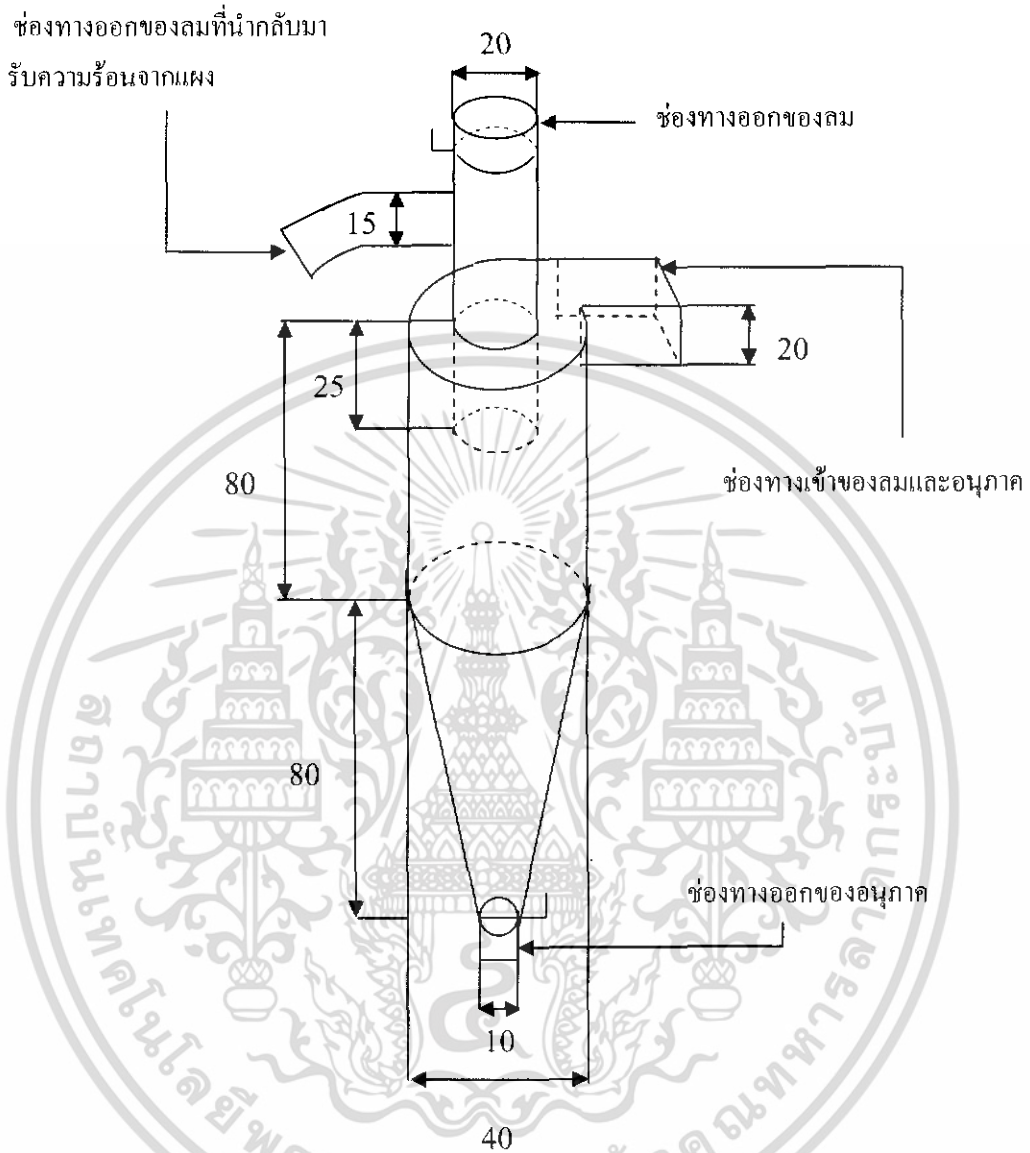
กลไกที่ใช้เก็บอนุภาคในไซโคลนมี 2 อย่าง คือ

1. แรงหนีศูนย์กลางหรือแรงเหวี่ยง ซึ่งเกิดจากการทำให้กระแสอากาศมีการหมุน ทำให้อนุภาคถูก เหวี่ยงไปยังผนังของไซโคลน
2. แรงถ่วง เมื่ออนุภาคเคลื่อนถึงผนังของไซโคลนแล้ว อนุภาคที่หนักจะได้รับแรงถ่วงทำให้อนุภาคตกลงไปที่ถังพักข้างล่าง

**หลักการทำงาน**

ไซโคลนประกอบด้วยส่วนรูปทรงกระบอก และมีปลายเป็นรูปโคน อากาศเคลื่อนเข้าสู่ไซโคลนในแนวสัมผัสที่ใกล้ส่วนบนของเครื่องมือด้วยความเร็วประมาณ 30 เมตรต่อวินาที เมื่ออากาศผ่านเข้ามาในไซโคลนจะเกิดกระแสวน (เรียกว่า main vortex) ขึ้น ซึ่งทำให้เกิดแรงหนีศูนย์กลางเหวี่ยงอนุภาคไปยังผนังของไซโคลนกระแสวนนี้จะเคลื่อนลงจนถึงจุดหนึ่งที่อยู่เกือบปลายโคน อากาศจะหมุนกลับเป็นกระแสวนที่เล็กกว่าเดิม (เรียกว่า core vortex) และเคลื่อนที่ขึ้นไปตามตัวไซโคลน จนออกไปทางท่อออกที่อยู่ส่วนบนของเครื่อง นั่นคือมีกระแสวน 2 ชั้น (double vortex) เกิดขึ้นในทิศทางเดียวกันสำหรับอนุภาค ที่ถูกเหวี่ยงไปยังผนังของไซโคลนจะเคลื่อนที่ลงไปยังส่วนปลายของโคนไปยังถังพัก (Hopper) เนื่องจากแรงถ่วง ส่วนอากาศที่ไม่มีอนุภาคก็จะหมุนออกไปทางท่อออกที่อยู่ส่วนบนของไซโคลน ชนิดของไซโคลนที่ใช้ คือ ไซโคลนที่อากาศไหลเข้าตามแนวเส้นสัมผัส (tangential entry cyclone)โดยทั่วไปอากาศไหลเข้าสู่ไซโคลนตามแนวสัมผัสเพื่อให้เกิดการหมุนวน ท่อเข้ามักเป็นรูปสี่เหลี่ยมมีผนังภายในค่อยๆโค้งและสัมผัสกับไซโคลนส่วนที่เป็นทรงกระบอกสำหรับไซโคลนชนิดที่มีทางเข้าตามแนวแกนอากาศและอนุภาคเข้าสู่ไซโคลนตามแนวแกนของเครื่องโดยผ่านช่องทางออกของลมด้านบนไซโคลน แสดงได้ดังรูปที่ 3.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**รูปที่ 3.3** ไซโคลน

**หมายเหตุ** หน่วยที่ใช้ : เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 3.4 พัดลมดูดอากาศ

พัดลมดูดอากาศ เป็นอุปกรณ์ทำหน้าที่ดูดอากาศรอบๆแผงรับแสงอาทิตย์ เข้ามาในตัวแผงรับแสงอาทิตย์ อากาศที่ดูดเข้ามาจะสัมผัสกับแผ่นรับความร้อนส่งผลให้อากาศที่สัมผัสแผ่นความร้อนร้อนขึ้น และส่งอากาศร้อนเข้าสู่คอลัมน์ พัดลมดูดอากาศแสดงได้ดังรูปที่ 3.4 โดยมีรายละเอียดดังนี้

ชนิด : high speed centrifugal blower

รุ่น : AEEF

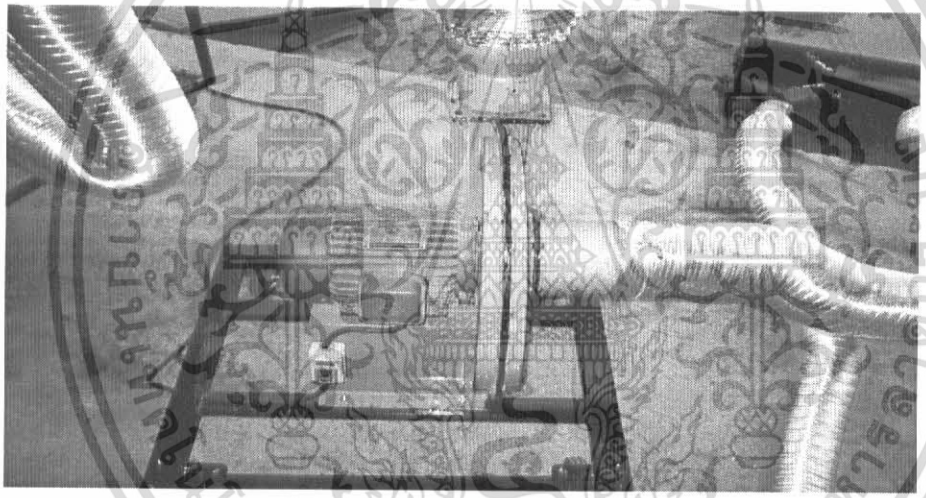
กำลังงาน : 1.5 กิโลวัตต์

ความเร็วรอบ : 2840 รอบต่อนาที

ความต่างศักย์ : 220-380 โวลต์

ความถี่ : 50 เฮิร์ตซ์

กระแส : 3.2 แอมแปร์



**รูปที่ 3.4** เครื่องพัดลมดูดอากาศ (Blower)

## 3.5 ระบบต่อเชื่อมอุปกรณ์

อุปกรณ์ที่ใช้ในการต่อเชื่อมระบบอุปกรณ์

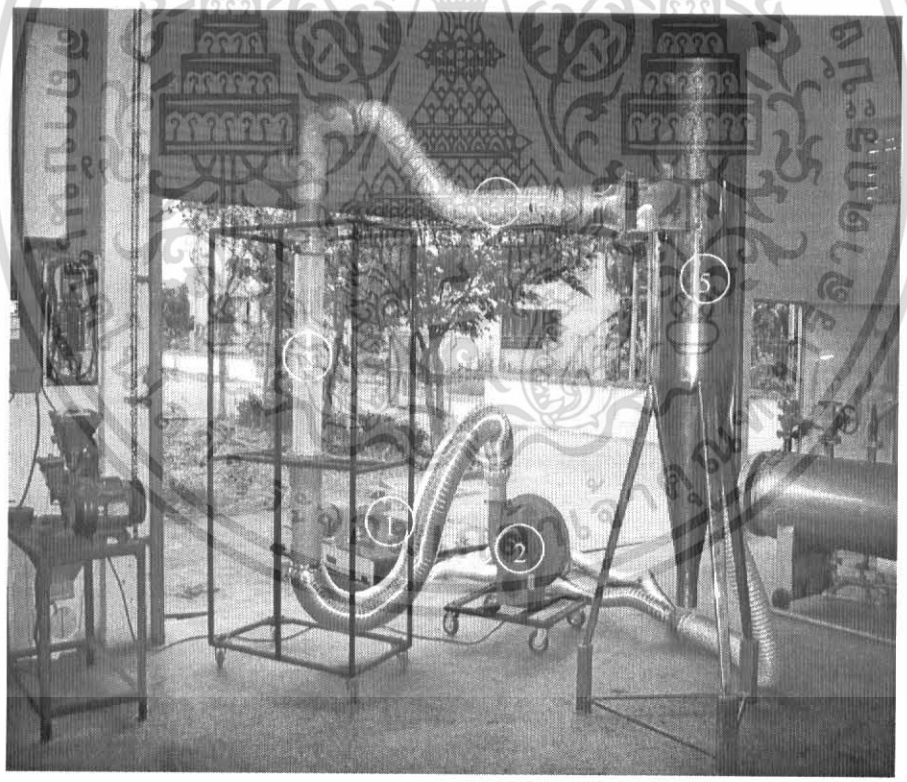
1. ท่อฟอยล์ ขนาดเส้นเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 นิ้ว
2. ท่อฟอยล์ ขนาดเส้นเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว
3. ท่อฟอยล์ ขนาดเส้นเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว

ในการประกอบระบบต่อเชื่อมอุปกรณ์ ท่อฟอยล์ขนาดเส้นเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 นิ้ว ต่อเข้ากับพัดลมดูดอากาศและคอลัมน์ ท่อฟอยล์ขนาดเส้นเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้วต่อเข้ากับพัดลมดูดอากาศและแผงรับแสงอาทิตย์ รวมทั้งใช้ต่อระหว่างคอลัมน์กับไซโคลน ส่วนท่อฟอยล์ขนาดเส้นเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้วใช้ต่อระหว่างไซโคลนกับแผงรับแสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 3.6 หลักการทำงานของเครื่องเก็บความร้อนจากแสงอาทิตย์สำหรับการอบแห้งธัญญพืช

ส่วนประกอบเครื่องเก็บความร้อนจากแสงอาทิตย์สำหรับการอบแห้งธัญญพืช สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.6 มีขั้นตอนการทำงาน กล่าวคือ เมื่อแผงรับแสงอาทิตย์ (หมายเลข 1)ได้รับพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ จะเก็บสะสมพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ไว้ที่แผ่นรับรังสีเพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้กับอากาศที่ไหลผ่านโดยเครื่องพัดลมดูดอากาศ (หมายเลข 2) จะดูดลมให้ไหลผ่านแผงรับพลังงานแสงอาทิตย์ ทำให้ลมที่ไหลผ่านมีอุณหภูมิสูงขึ้น กลายเป็นลมร้อน ลมร้อนจะถูกพาเข้าสู่คอลัมน์ฟลูอิดไดซ์เบดที่บรรจุวัสดุอบอยู่ (หมายเลข 3) ทำให้วัสดุเกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไดซ์เซชั่น ซึ่งพื้นที่ผิวของวัสดุในการถ่ายเทความร้อนจะเพิ่มขึ้น ทำให้วัสดุสูญเสียความชื้นอย่างรวดเร็ว วัสดุที่สูญเสียความชื้นจะมีน้ำหนักต่อปริมาตรลดลง จึงหลุดลอยออกจากคอลัมน์โดยส่งผ่านท่อฟอยล์ (หมายเลข 4)ไปยังไซโคลน (หมายเลข 5) จากคุณสมบัติดังกล่าวสามารถแยกวัสดุที่มีความชื้นที่แตกต่างกันได้ เมื่อวัสดุถูกพัดเข้าสู่ไซโคลน ไซโคลนจะทำหน้าที่แยกวัสดุกับลมร้อนที่ผ่านการเข้าสู่แผงรับพลังงานแสงอาทิตย์อีกครั้งเพื่อเพิ่มความร้อนแก่อากาศภายนอกที่เข้ามาใหม่ แล้วนำมาใช้อบแห้งวัสดุ




**รูปที่ 3.6** เครื่องเก็บความร้อนจากแสงอาทิตย์สำหรับการอบแห้งธัญญพืช
1. แผงรับแสงอาทิตย์ 2. พัดลมดูดอากาศ 3. คอลัมน์อบแห้ง 4. ท่อฟอยล์ 5. ไซโคลน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 4
# วิธีดำเนินการทดลอง

การศึกษาแผงรับพลังงานแสงอาทิตย์ในโครงงานนี้มีขั้นตอนการทดลองดังนี้

1. ศึกษาการหาประสิทธิภาพของแผงรับแสงอาทิตย์
2. ศึกษาการหาความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือกที่ได้หลังการอบแห้งกับความเร็วลมที่ใช้ในการอบแห้ง

## 4.1 ศึกษาการหาประสิทธิภาพของแผงรับแสงอาทิตย์

โครงงานนี้ได้ทำการศึกษาหาประสิทธิภาพของแผงรับแสงอาทิตย์ จากนั้นทำการทดลองเพื่อศึกษาว่าระยะห่างระหว่างแหล่งให้พลังงานความร้อนกับแผงรับแสงอาทิตย์มีผลอย่างไรต่อประสิทธิภาพของแผงรับแสงอาทิตย์ นอกจากนี้ยังทำการศึกษาผลของความเร็วลมที่มีผลต่อประสิทธิภาพของแผงรับแสงอาทิตย์ พลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ในแต่ละวันมีค่าพลังงานความร้อนไม่สม่ำเสมอ เช่น ฝนตก เมฆบดบังแสงอาทิตย์ เป็นต้น ส่งผลให้การทดสอบหาประสิทธิภาพของแผงรับแสงอาทิตย์มีค่าผิดพลาดจากความเป็นจริง ในการทดลองจึงใช้แผงให้ความร้อนทดแทนพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์

**อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง**

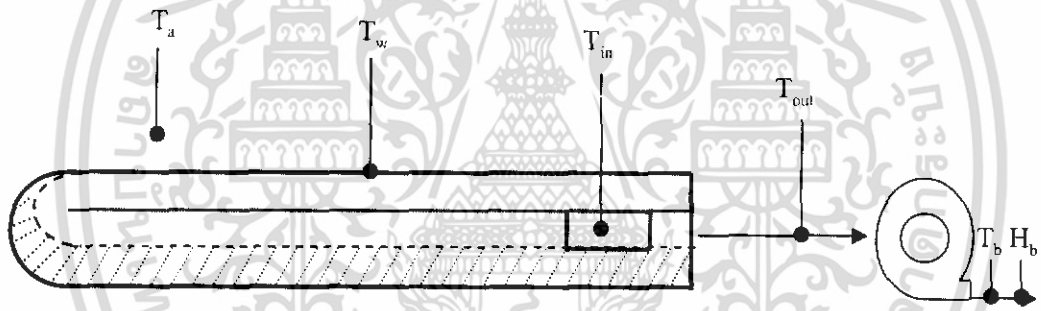
1. ตัวแผงรับแสงอาทิตย์ขนาด ความยาว 1.98 เมตร กว้าง 1.22 เมตร
2. แผงให้ความร้อนขนาดความยาวและความกว้างเท่ากับแผงรับแสงอาทิตย์
3. ฮีทเตอร์อินฟาเรดแบบกระเบื้องให้ความร้อนขนาดความยาว 245 มิลลิเมตร กว้าง 60 มิลลิเมตร จำนวน 6 ตัว ขนาดให้ความร้อนของฮีทเตอร์ตัวละ 1000 วัตต์/220 โวลต์
4. เทอร์โมคัปเปิล รุ่น K-CA ช่วงการวัดอุณหภูมิ 0-400 องศาเซลเซียส
5. เทอร์โมมิเตอร์ช่วงการวัดอุณหภูมิ 0-100 องศาเซลเซียส จำนวน 2 อัน
6. มิเตอร์วัดอุณหภูมิของอากาศแบบดิจิตอลและมิเตอร์วัดความชื้นแบบดิจิตอล
7. พัดลมดูดอากาศ กำลัง 0.75 กิโลวัตต์
8. มิเตอร์วัดอัตราความเร็วลมแบบดิจิตอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**วิธีการทดลอง**

การทดสอบหาประสิทธิภาพของแผงรับแสงอาทิตย์จะใช้แผงให้ความร้อนที่มีพลังงานให้ความร้อน 1000วัตต์/220โวลต์ ซึ่งมีอุณหภูมิที่ผิวให้ความร้อนเท่ากับ 750 องศาเซลเซียส วางเหนือระนาบของแผงรับแสงอาทิตย์จากนั้นปรับความสูงของแผงให้ความร้อนที่ความสูงต่างๆ พร้อมทั้งปรับอัตราความเร็วลมของพัดลมดูดอากาศจากนั้นทำการเก็บข้อมูลที่จะนำไปศึกษาได้แก่ อุณหภูมิของอากาศที่เข้าสู่แผงรับแสงอาทิตย์( $T_{in}$) อุณหภูมิของอากาศที่ออกจากแผงรับแสงอาทิตย ($T_{out}$) อุณหภูมิที่ผิวกระจก ($T_w$) จุดที่เก็บข้อมูลที่นำไปศึกษาดังรูปที่ 4.1 โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. ปรับตัวแผงรับแสงอาทิตย์ให้ราบทำมุมกับพื้น 0 องศา
2. ปรับความสูงของแผงให้ความร้อนที่ความสูงต่างๆ ได้แก่ 0.85, 0.9, และ 1 เมตร
3. ปรับความเร็วลมที่ความเร็วลมต่างๆได้แก่ 5, 8, 10, 12, 15 และ 18 เมตร/วินาที
4. เก็บข้อมูลโดยการวัดอุณหภูมิที่จุดต่างๆ ดังรูปที่ 4.1
5. บันทึกข้อมูลและนำผลไปคำนวณ
6. สรุปและวิเคราะห์ผล




**รูปที่ 4.1** รูปตำแหน่งข้อมูลที่ทำการศึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 ศึกษาการหาความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือกที่ได้หลังการอบแห้งกับความเร็วลมที่ใช้ในการอบแห้ง

การทดลองจะปรับค่าความเร็วลมให้มีค่าแตกต่างกัน เพื่อทดสอบว่าอุณหภูมิที่ออกจากแผงจะมีผลต่อการอบแห้งหรือไม่ โดยสภาวะของอุณหภูมิข้าวเปลือกก่อนอบมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิของบรรยากาศห้อง เมื่อผ่านลมร้อนเข้าไปอุณหภูมิของข้าวเปลือกจะมีอุณหภูมิที่ผิวความชื้นเท่ากับอุณหภูมิลมร้อน และมีการถ่ายเทความร้อนระหว่างอากาศร้อนและเมล็ดข้าวเปลือก ส่งผลทำให้ความชื้นในเมล็ดข้าวลดลง

**อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง**

1. เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์
2. เมล็ดข้าวเปลือก
3. เทอร์โมคัปเปิล รุ่น K-CA ช่วงอุณหภูมิการวัด 0-400 องศาเซลเซียส
4. เทอร์โมมิเตอร์ช่วงอุณหภูมิการวัด 0-100 องศา จำนวน 2 อัน
5. มิเตอร์วัดอุณหภูมิของอากาศแบบดิจิตอลและมิเตอร์วัดความเร็วลมแบบดิจิตอล
6. มิเตอร์วัดอัตราความเร็วลมแบบดิจิตอล
7. เครื่องชั่งน้ำหนัก
8. นาฬิกาจับเวลา

**วิธีการทดลอง**

1. นำเมล็ดข้าวเปลือก ใส่ในคอลัมน์เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์
2. ทำการทดลอง โดยปรับความเร็วพัดลมดูดอากาศ 15, 12, 10 และ 8 เมตร/วินาที และปรับความสูงของแผงให้ความร้อนที่ความสูงต่างๆ 0.85, 0.9, และ 1 เมตร ตามลำดับ
3. จับเวลาตั้งแต่เริ่มเปิดพัดลมดูดอากาศจนกระทั่งเกิดการหลุดลอยของเมล็ดวัสดุอบจนหมดจากคอลัมน์อบแห้ง พร้อมทั้งทำการวัดอุณหภูมิและความชื้นของลมร้อนทั้งก่อนอบและหลังจากทำการอบแห้ง บันทึกข้อมูลที่ได้
4. นำเมล็ดข้าวเปลือกอบแห้งแล้วที่หลุดออกมาจากไซโคลนไปทำการชั่งน้ำหนัก บันทึกผล จากนั้นนำเมล็ดข้าวเปลือกที่ได้จากการชั่งไปทำการอบแห้งที่คอลัมน์อีกครั้ง
5. บันทึกข้อมูลและนำผลไปคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความชื้นของข้าวเปลือก
6. สรุปและวิเคราะห์ผล

ในการทดลอง จะต้องหาเปอร์เซ็นต์ความชื้นที่มีอยู่ในเมล็ดข้าวเปลือกก่อนการอบแห้ง เพื่อที่จะนำไปคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความชื้นหลังการอบแห้ง ในการหาเปอร์เซ็นต์ความชื้นที่มีอยู่ในเมล็ดข้าวเปลือกก่อนการอบแห้งจะคำนวณจากน้ำหนักแห้งสุทธิของเมล็ดข้าวเปลือก หาโดยการนำเมล็ดข้าวเปลือกอบแห้งจนกว่าน้ำหนักจะคงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 5
# ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

## 5.1 การหาประสิทธิภาพของแผงรับแสงอาทิตย์

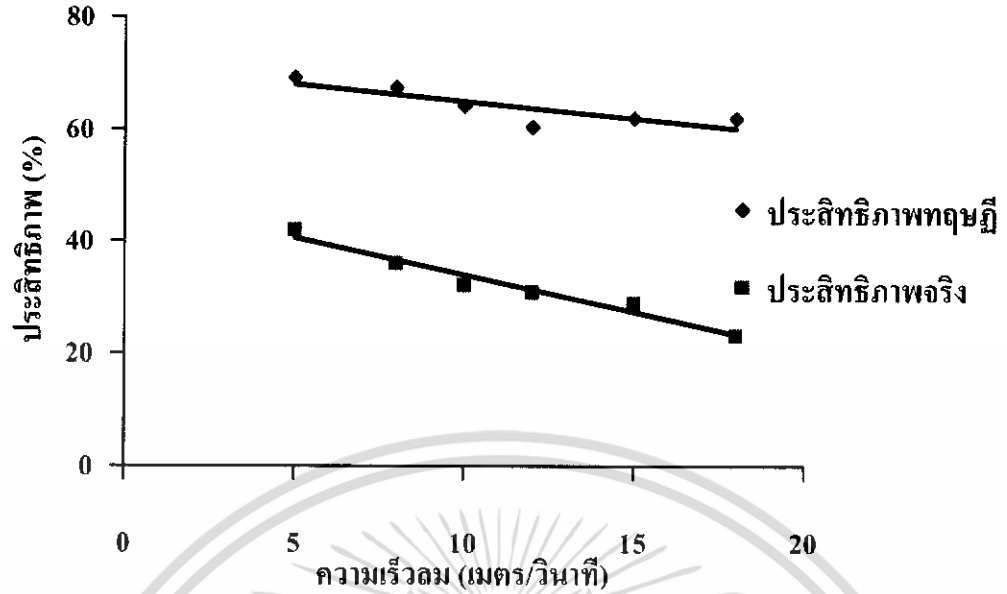
จากการศึกษาผลของระยะห่างระหว่างแผงให้ความร้อนกับแผงรับอาทิตย์โดยการแปรเปลี่ยนระยะความสูงของแผงให้ความร้อนตั้งแต่ 0.85, 0.9 และ 1 เมตร พบว่าที่ระยะความสูง 0.85 เมตรจะให้พลังงานความร้อนและอุณหภูมิที่สูงแก่แผงรับแสงอาทิตย์มากกว่าที่ระยะ 0.9 เมตร และ 1 เมตร ดังแสดงในตารางที่ 5.1 ข้อมูลดิบแสดงดัง ภาคผนวก ค ตารางที่ ค 1.1 - ค1.3 ความร้อนจะถ่ายเทความร้อนมายังแผงรับแสงอาทิตย์ได้เร็ว เมื่อระยะความห่างของแผงให้ความร้อนห่างจากแผงรับแสงอาทิตย์เป็นระยะทางที่สั้น ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีที่ว่าพลังงานความร้อนของแผงให้ความร้อน ($Q_h$) แปรผกผันกับระยะห่างของแผงให้ความร้อนที่ห่างจากแผงรับแสงอาทิตย์ ตัวอย่างการคำนวณและข้อมูลดิบแสดงดัง ภาคผนวก ก

**ตารางที่ 5.1** พลังงานความร้อนของแผงให้ความร้อนโดยเฉลี่ยที่ให้ความร้อนกับแผงรับแสงอาทิตย์

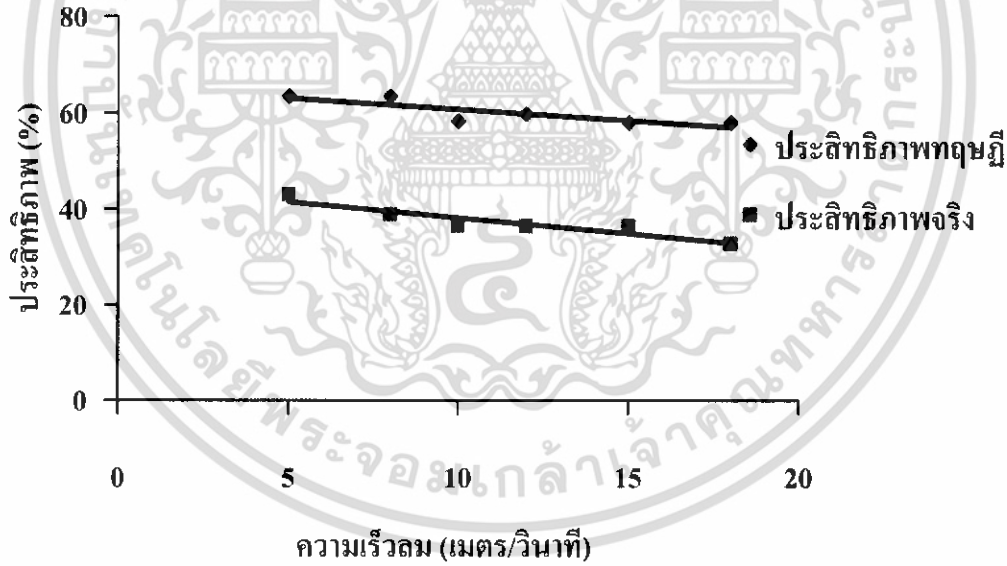
| ความสูงของแผงความร้อน (เมตร) | $Q_h$ (วัตต์) |
|---|---|
| 0.85 | 1574.60 |
| 0.90 | 1427.27 |
| 1.00 | 1497.31 |

จากการทดสอบผลของความเร็วลมที่มีผลต่อประสิทธิภาพแผงรับแสงอาทิตย์ทำโดยปรับความเร็วลมตั้งแต่ 5-18 เมตร/วินาที สำหรับที่ระยะห่างของแผงให้ความร้อน 0.85 , 0.9 และ 1 เมตร พบว่าเมื่อปรับความเร็วลมให้มีค่าต่ำๆ จะทำให้อากาศจากภายนอกไหลเข้าแผงรับแสงอาทิตย์ไปได้ช้าโอกาสที่แผ่นรับรังสีความร้อนจะสัมผัสกับอากาศและถ่ายเทมวลความร้อนกับมวลความร้อนของอากาศที่มีอุณหภูมิต่ำจึงมีมากกว่า การปรับความเร็วลมให้เร็ว ประสิทธิภาพของแผงรับแสงอาทิตย์ที่ได้จากการปรับความเร็วลมให้มีค่าต่ำๆจึงมีค่าประสิทธิภาพมากกว่าการปรับความเร็วลมให้มีค่าสูงๆข้อมูลดิบแสดงดัง ภาคผนวก ค ตารางที่ ค1.4- ค1.6 ซึ่งจะเหจะแปรผกผันกับความประสิทธิภาพของแผงรับแสงอาทิตย์ ดังแสดงรูปที่ 5.1- 5.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

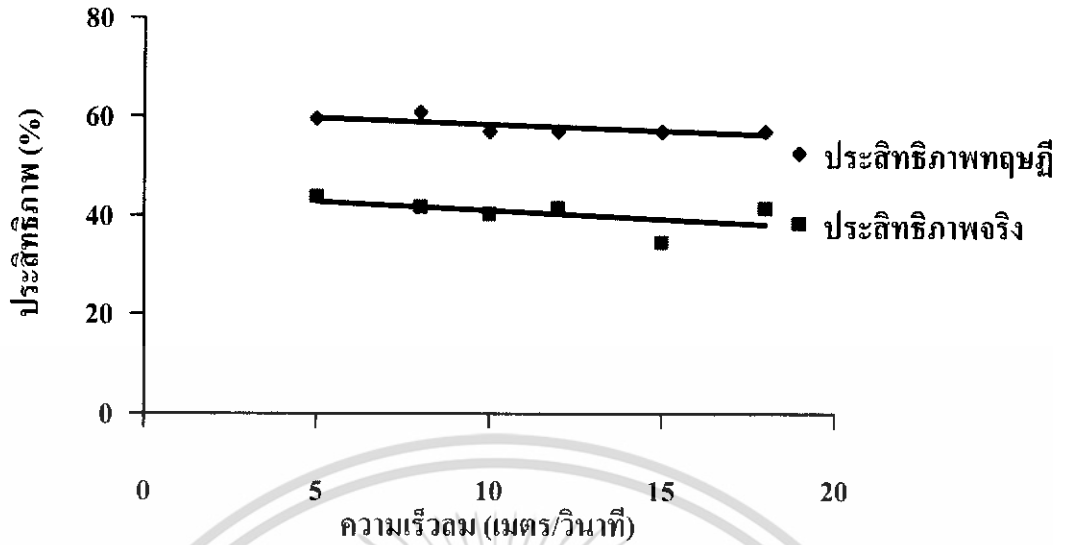



**รูปที่ 5.1** ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมและประสิทธิภาพแผงรับแสงอาทิตย์ที่ความสูงของแผงให้ความร้อน 1 เมตร




**รูปที่ 5.2** ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมและประสิทธิภาพแผงรับแสงอาทิตย์ที่ความสูงของแผงให้ความร้อน 0.9 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



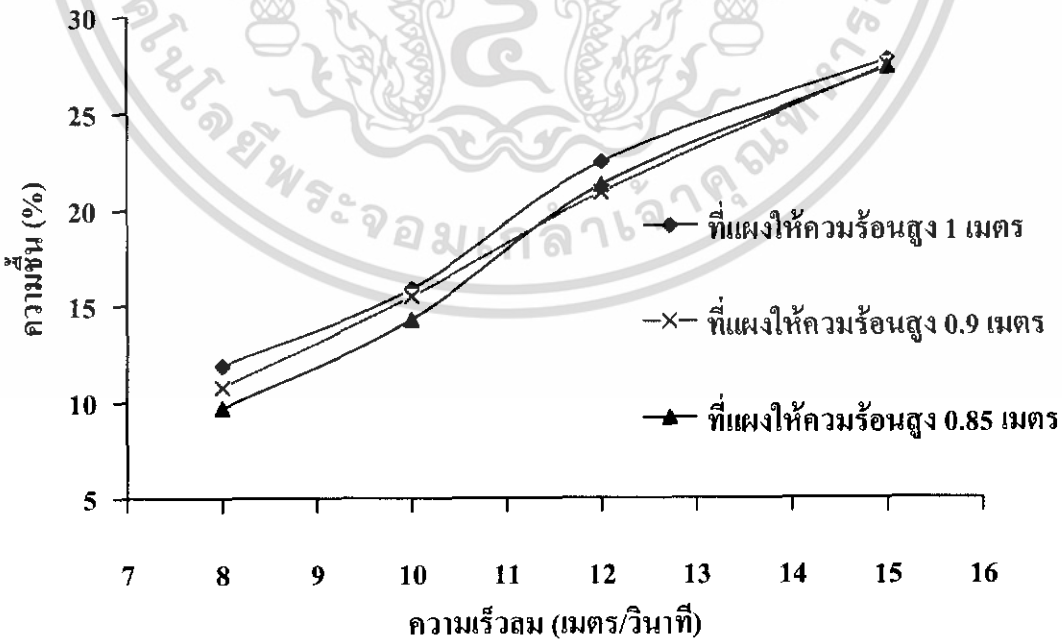

**รูปที่ 5.3** ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมและประสิทธิภาพแผงรับแสงอาทิตย์ที่ความสูงของแผงให้ความร้อน 0.85 เมตร

โดยสรุปจะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพของแผงรับแสงอาทิตย์ที่หาได้จริง จะมีค่าสูงหรือต่ำขึ้นอยู่กับค่าพลังงานความร้อนที่แผงรับแสงอาทิตย์ได้รับ เมื่อปรับระยะห่างของแผงให้ความร้อนที่ระยะห่างแตกต่างกันพร้อมปรับความเร็ว พบว่าที่ระยะห่างน้อยๆและค่าความเร็วลมต่ำๆ จะได้ค่าประสิทธิภาพที่สูงมากกว่า ระยะห่างมากๆ และค่าความเร็วลมสูงๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.2 ศึกษาการหาความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือกที่ได้หลังการอบแห้งกับความเร็วลมที่ใช้ในการอบแห้ง

การหาเปอร์เซ็นต์ความชื้นที่เหลือในเมล็ดข้าวเปลือก ได้ทำการทดลองหาน้ำหนักแห้งสุทธิของเมล็ดข้าวเปลือก ซึ่งผลการทดลองได้น้ำหนักแห้งสุทธิเฉลี่ยเท่ากับ 1998.6 กรัม (ภาคผนวก ค ตารางที่ ค 2.1 ) นำผลการทดลองนี้คำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความชื้นที่มีอยู่ในเมล็ดข้าวเปลือกเริ่มต้นได้เท่ากับ 30 เปอร์เซ็นต์ และการทดลองหาเปอร์เซ็นต์ความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือกที่ได้หลังจากการอบ ได้ปรับอัตราความเร็วลมและความสูงของแผงให้ความร้อนในระดับต่างๆ (ภาคผนวก ค ตารางที่ ค 2.2- 2.4) และนำผลการทดลองระหว่างอัตราความเร็วลมและเปอร์เซ็นต์ความชื้นในเมล็ดข้าวเปลือกมาสร้างกราฟ จากรูปที่ 5.4 ความเร็วลมที่ใช้กับเปอร์เซ็นต์ความชื้นในเมล็ดข้าวเปลือก ในสภาวะเงื่อนไขอุณหภูมิอากาศเริ่มต้นคงที่ (ภาคผนวก ค ตารางที่ ค 2.2-ค 2.4) พบว่าที่ความเร็วลม 15 เมตร/วินาทีของแต่ละความสูงของแผงให้ความร้อน พบว่า มีค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นที่ความสูงของแผง 0.85, 0.9, 1 เมตร เท่ากับ 27.8, 27.5, 27.8 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และที่ความเร็วลม 8 เมตร/วินาที ของแต่ละความสูงของแผงให้ความร้อน พบว่า มีค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นที่ความสูงของแผง 0.85, 0.9, 1 เมตร เท่ากับ 9.7, 10.8, 11.9 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เนื่องจากเกิดการถ่ายเทความร้อนและการระเหยความชื้น และสามารถอธิบายได้ว่าเมื่อปรับความเร็วลมลดลงส่งผลให้เปอร์เซ็นต์ความชื้นในเมล็ดข้าวเปลือกลดลง จึงสรุปได้ว่าความเร็วลมแปรผันตรงกับเปอร์เซ็นต์ความชื้นในเมล็ดข้าวเปลือก




**รูปที่ 5.4** ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมกับเปอร์เซ็นต์ความชื้นในเมล็ดข้าวเปลือก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 6
# สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษากระบวนการอบแห้งแบบใช้พลังงานแสงอาทิตย์ และ การหาประสิทธิภาพของแผงรับแสงอาทิตย์และ การหาความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้นกับอัตราความเร็วลม สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. การนำแผงให้ความร้อนมาใช้ให้ความร้อนแก่แผงรับแสงอาทิตย์ความร้อนที่ถ่ายเทมาให้แผงรับแสงอาทิตย์ขึ้นอยู่กับการปรับระยะห่างของแผงให้ความร้อน เมื่อเปรียบเทียบที่ระยะห่างของความสูงต่ำๆและที่ระยะห่างของแผงให้ความร้อนสูงๆพบว่าที่ระยะห่างความสูงต่ำๆพลังงานความร้อนของแผงให้ความร้อนที่ให้แผงรับแสงอาทิตย์มีค่ามากกว่าที่ระยะห่างของแผงให้ความร้อนสูงๆ

2. ในการทดลอบการหาประสิทธิภาพของแผงรับแสงอาทิตย์ ศึกษาและทดลองวัดค่าผลของอัตราความเร็วที่มีผลต่อประสิทธิภาพของแผงรับพลังงานแสงอาทิตย์ พบว่าเมื่อทดลองเปลี่ยนความเร็วลมเพิ่มขึ้น จะส่งผลทำให้ประสิทธิภาพของแผงรับแสงอาทิตย์มีค่าลดลง เนื่องจากโอกาสที่ความร้อนของแผ่นรับความร้อนจะถ่ายเทมวลความร้อนให้อากาศที่มาสัมผัสมีน้อยกว่า การปรับให้ความเร็วลมของอากาศเข้ามาสัมผัสแผ่นรับความร้อนที่ความเร็วลมต่ำๆ ในการปรับความเร็วลมของพัดลมดูดอากาศให้ความเร็วลมต่ำจะทำให้อากาศที่ถูกดูดเข้ามาสัมผัสกับแผ่นรับความร้อนและถ่ายเทมวลความร้อนกับมวลอากาศที่ถูกดูดเข้ามาได้ดี ทำให้อากาศที่อยู่ในแผงรับแสงอาทิตย์มีอุณหภูมิสูงขึ้นโครงงานนี้ใช้แผงรับแสงอาทิตย์แบบอากาศไหลจากล่างของแผ่นรับความร้อนไปยังด้านบนของแผ่นรับความร้อน สามารถเพิ่มอุณหภูมิของอากาศที่ไหลเข้ามาในแผงรับแสงอาทิตย์และสัมผัสกับแผ่นรับความร้อนจากเดิมได้ถึง 5-12 $^{\circ}C$ และประสิทธิภาพของแผงรับแสงอาทิตย์ประมาณ 23-47 เปอร์เซ็นต์

3. การทดลองหาน้ำหนักสุทธิเมล็ดข้าวเปลือก ในการทดลองเมื่อนำเมล็ดข้าวเปลือกไปอบในตู้อบที่น้ำหนักเริ่มต้น 2600 กรัม พบว่า น้ำหนักสุทธิเมล็ดข้าวเปลือกเท่ากับ 2004.8, 1997.4 และ 1993.7 กรัม ตามลำดับ ได้น้ำหนักแห้งสุทธิเท่ากับ 1998.6 กรัม คำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความชื้นเริ่มต้นของเมล็ดข้าวเปลือกได้เท่ากับ 30 เปอร์เซ็นต์

4. ในการทดลองนี้ เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์สามารถอบแห้งเมล็ดข้าวเปลือกจากเปอร์เซ็นต์ความชื้นเริ่มต้น 30 เปอร์เซ็นต์ ลดเหลืออยู่ในช่วง 27.8 ถึง 9.7 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนระหว่างอากาศร้อนและเมล็ดข้าวเปลือก เกิดการระเหยขึ้น เปอร์เซ็นต์ความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือกจึงลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้นในเมล็ดข้าวและอัตราความเร็วลมเมื่อปรับความเร็วลมลดลง พบว่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นในเมล็ดข้าวลดลง สามารถสรุปได้ว่า ความเร็วลมแปรผันตรงกับเปอร์เซ็นต์ความชื้นในเมล็ดข้าวเปลือก

## 6.1 ข้อเสนอแนะ

ข้อจำกัดของเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดพร้อมทั้งแนวทางแก้ไข

1. ในการลำเลียงเมล็ดวัสดุอบแห้งที่ผ่านกระบวนการอบแห้งแล้วออกจากคอลัมน์ พบว่ามีเมล็ดวัสดุบางส่วนติดค้างตามข้อต่อและข้องอทำให้มีการสูญหายของน้ำหนักเมล็ดวัสดุ แนวทางการแก้ไข ควรเพิ่มความสูงของแนวระดับของข้อต่อ และข้องอให้อยู่ในระดับเดียวกันเพื่อให้เมล็ดวัสดุลำเลียงผ่านได้สะดวก และควรปรับความเร็วลมของพัดลมดูดอากาศไปที่ความเร็วลมสูงสุด ก่อนที่จะทำการอบแห้งทุกครั้งเพื่อเพิ่มความดันให้เมล็ดวัสดุที่ติดค้างออกไปจนหมด

2. แหล่งที่ให้พลังงานความร้อนแก่แผงรับแสงอาทิตย์พบว่าหากวันใดไม่มีแสงแดดเพียงพอก็จะเป็นอุปสรรคต่อการเพิ่มอุณหภูมิกับลมร้อนควรมีแหล่งให้พลังงานความร้อนประเภทอื่นสำรองไว้ใช้งานในสถานการณ์ที่แสงแดดไม่เพียงพอ เช่น เครื่องทำความร้อนที่ใช้แหล่งพลังงานจากไฟฟ้า เป็นต้น

3. การทดสอบหาประสิทธิภาพของแผงรับแสงอาทิตย์แหล่งให้ความร้อนที่ให้กับแผงรับแสงอาทิตย์จะใช้แผงให้ความร้อนและค่าพลังงานความร้อนที่ให้ คือ 1000วัตต์/220โวลต์ ให้อุณหภูมิที่ผิวของแผงให้ความร้อนเท่ากับ 750 เซลเซียส โดยคุณสมบัติดังกล่าวจะนำมาคำนวณหาความร้อนที่ได้จากแผงให้ความร้อน ค่าพลังงานความร้อนที่ได้จึงมีความจะคลาดเคลื่อนเนื่องจากไม่ทราบว่าประสิทธิภาพจริงของแผงดังนั้น แนวทางการแก้ไขควรมีการตรวจวัดอุณหภูมิที่แท้จริงของผิวแผงให้ความร้อนด้วยอุปกรณ์ตรวจที่มีขนาดช่วงการวัดสูงๆเช่น เทอร์โมคับเปิล รุ่น K-CA ขนาดช่วงการวัดอุณหภูมิ 0-1000 องศาเซลเซียส เป็นต้น

4. ในการหาน้ำหนักสุทธิของเมล็ดข้าวเปลือก ควรอบแห้งเมล็ดข้าวเปลือกในคอลัมน์อบแห้งต่อไปหลังจากการทดลองจนกว่าน้ำหนักของเมล็ดข้าวเปลือกจะคงที่ มากกว่าที่จะไปอบในเตาอบไฟฟ้า เพื่อเป็นการทดสอบว่าเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพในการอบแห้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# เอกสารอ้างอิง


[1] ธงชัย ศิริประยุกต์. 2528. **พลังงานแสงแดด (introduction to solar energy).** กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

[2] Ekechukwu, O. V. and Norton, B. "Review of Solar-energy Drying Systems III : Low Temperature Air-heating Solar Collectors for Crop Drying Applications" **Energy Conversion ad management**, Volume 40, Issue 6, April 1999, Pages 657-549.

[3] มานิช ทองประเสริฐ และสมศรี จงรุ่งเรือง. 2524. **พลังงานแสงอาทิตย์**. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

[4] ผศ.ดร. พงษ์เจต พรหมวงศ์. 2542. **การถ่ายเทความร้อน**. กรุงเทพฯ : ห้างหุ้นส่วนกำจัด วีเจ พริ้นติ้ง.

[5] เรียวโซ โทเอ. 2527. **อุปกรณ์อบแห้งในอุตสาหกรรม**. แปลโดย วิรัตน์ ตัณฑะพานิชกุล. ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).

[6] Leith, D. and Mehta, D. "Cyclone Perfermance and Design". **Atmos Env.** 1973, Pages 527–549.

[7] สำนักงานศึกษาและพัฒนาพลังงาน. 2540. สถิติศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์. กรุงเทพฯ : ฝ่ายสำรวจการประเมินศักยภาพแหล่งพลังงานส่วนสำรวจ การพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม.


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ภาคผนวก ก
# ตัวอย่างการคำนวณ

## ก.1 การหาประสิทธิภาพของแผงรับแสงอาทิตย์

โดยมีสมมติฐานก่อนที่จะใช้สมการคำนวณดังนี้

1. พลังงานความร้อนที่ได้จากแผงให้ความร้อนกระจายความร้อนทั่วแผงรับอย่างสม่ำเสมอ
2. แผงรับแสงอาทิตย์ทำงานที่สภาวะคงตัวดังนั้นอัตราการสะสมพลังงานความร้อนที่ผิวรับรังสีมีค่าน้อยมาก
3. การสูญเสียความร้อนทางด้านข้างมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับพื้นที่การสูญเสียความร้อนด้านบนและด้านล่าง
4. การสูญเสียความร้อนด้านล่างมีค่าการสูญเสียความร้อนน้อยมากเนื่องจากพื้นที่ด้านล่างมีฉนวนป้องกันความร้อน

**ข้อมูลที่ใช้ในการทดลอง**

1. อุณหภูมิของฮีทเตอร์ขนาด 1000 วัตต์/220โวลต์ ให้ความร้อน 750 องศาเซลเซียส ( $T_h$ )
2. พื้นที่ของแผงรับแสงรังสี ( $A_c$ ) มีขนาดเท่ากับ 2.415 ตารางเมตร
3. ความยาวของแผงรับรังสี ( L ) 1.98 เมตร
4. พื้นที่หน้าตัดที่อากาศไหลเข้าสู่แผงรับแสงอาทิตย์ ($A_g$) 0.008 ตารางเมตร
5. ความเร็วลมเหนือระนาบแผงรับแสงอาทิตย์ขณะทดลอง 0- 2.8 เมตร / วินาที
6. ผลคูณระหว่างค่าการทะลุผ่านและค่าการดูดซับรังสีของกระจก ( $\tau\alpha$ ) มีค่าเท่ากับ 0.92
7. ค่าการส่งออกรังสีความร้อนของกระจก ( $\varepsilon_w$ ) มีค่าเท่ากับ 0.94
8. ค่าการส่งออกของรังสีความร้อนของฮีทเตอร์ที่ทำจากเซรามิค ( $\varepsilon_h$ ) มีค่าเท่ากับ 0.69
9. พื้นที่ของฮีทเตอร์จำนวน 6 ตัว ( $A_h$ ) มีค่าเท่ากับ 0.0882 ตารางเมตร
10. ค่าคงที่ Boltzmann ($\sigma$) มีค่าเท่ากับ $5.676 \times 10^{-8}$ วัตต์ /( เมตร )$^2$(องศาเคลวิน)$^4$

**ขั้นตอนการคำนวณ**

1. คำนวณความเร็วลมเฉลี่ยเพื่อนำไปใช้ในการคำนวณหาค่า $N_{RE.L}$ ดังนี้

$$U_{avg} = \frac{W_1 U_1 + W_2 U_2}{W_1 + W_2}$$

โดยที่

$U_{avg}$ ความเร็วลมเฉลี่ย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$U_1$ ความเร็วลมต่ำสุด

$U_2$ ความเร็วลมสูงสุด

$W_1$ อัตราส่วนการถ่วงน้ำหนักของการเกิดความเร็วลมต่ำสุด

$W_2$ อัตราส่วนการถ่วงน้ำหนักของการเกิดความเร็วลมสูงสุด

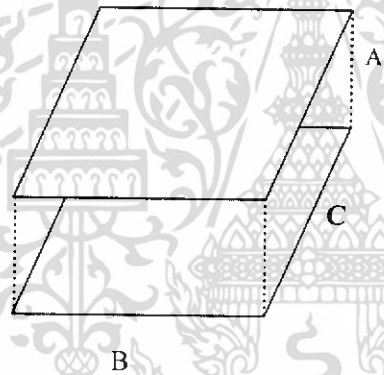
ดังนั้น

$$U_{avg} = 0.3(0) + 0.7(0.28) = 1.96 \text{ เมตร/วินาที}$$

2. คำนวณหาค่า $Q_h$ จากสมการ(2.2,2.5)

$$Q_h = \sigma A_h \varepsilon_h F(T_h^4 - T_a^4) + h_h A_h (T_h - T_h)$$

$$F_{ij} = \frac{2}{\pi XY}\left\{ \ln\left[\frac{(1+X^2)(1+Y^2)}{1+X^2+Y^2}\right]^{1/2} + X(1+Y^2)^{1/2}\tan^{-1}\frac{X}{(1+Y^2)^{1/2}} + Y(1+X^2)^{1/2}\tan^{-1}\frac{Y}{(1+X^2)^{1/2}} - X\tan^{-1}X - Y\tan^{-1}Y \right\}$$




$$X = \frac{C}{A}, \quad Y = \frac{B}{A}$$

3. คำนวณค่า $Q_L$ จากสมการ(2.7)

$$Q_L = h_w A_c (T_w - T_a) + \sigma A_c \varepsilon_w (T_w^4 - T_a^4)$$

4. คำนวณหาค่า $Q_U$ จากสมการ(2.11)

$$Q_U = Q_h(\tau\alpha) - Q_L - Q_S$$

5. คำนวณหาประสิทธิภาพทางทฤษฎีของแผงรับแสงอาทิตย์จากสมการ(2.15)

$$\eta_i = \frac{Q_u \times 100}{Q_h}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. คำนวณหาประสิทธิภาพที่แท้จริงของแผงรับแสงอาทิตย์จากสมการ(2.16)

$$\eta_r = \frac{m\, C_{p,avg}\,(T_{out} - T_{in})\times 100}{Q_h}$$

$$m = \rho V_b A_g$$

เมื่อ

| | | |
|---|---|---|
| $m$ | อัตราการไหลโดยมวลของอากาศที่เข้าสู่แผงรับแสงอาทิตย์ | ( kg/s) |
| $C_{p,avg}$ | ความจุความร้อนจำเพาะเฉลี่ยของอากาศ | (J/kg-k) |
| $\rho$ | ความหนาแน่นของอากาศที่ไหลเข้าสู่แผง | ($kg/m^3$) |
| $V_B$ | ความเร็วลมของอากาศที่ไหลเข้าสู่แผง | ( m/s ) |

การหาประสิทธิภาพของแผงรับแสงอาทิตย์

การคำนวณหาค่าความร้อนที่ได้รับจากแผงให้ความร้อน($Q_h$)

ผลที่ได้จากการทดลองที่ความสูงของแผงให้ความร้อน 1 m

$T_h = 1023$ K

$T_a = 306$ K

$$T_{fh} = \frac{1023K + 306K}{2} = 664.5\ K$$

เมื่อ $T_{fh}$ อุณหภูมิฟิล์มของแผงให้ความร้อน (องศาเคลวิน)

สมบัติต่างๆของอากาศที่ $T_{fh}$

$\rho = 0.53$ $kg/m^3$

$\mu = 3.3911 \times 10^{-5}$ kg/m.s

$C_P = 1061.3$ J/kg.K

$k = 0.0465$ w/m.K

$N_{Pr} = 0.7729$

คำนวณหาค่า $N_{Re}$ จาก

$$N_{Re} = \frac{L\ U_{AVG}\ \rho}{\mu}$$

ดังนั้น

$$N_{Re} = \frac{1.98m \times 1.96m/s \times 0.53kg/m^3}{3.3911\times 10^{-5} kg/m.s} = 60653.59$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจาก $N_{Re} < 5\times10^5$ เป็นการไหลของอากาศแบบลามินาร์

คำนวณหาค่า $N_{UL}$ จาก

$$N_{UL} = 0.664(N_{Re})^{1/2}(N_{Pr})^{1/3}$$

ดังนั้น

$$N_{UL} = 0.664(60653.59)^{1/2}(0.7729)^{1/3} = 126.73$$

คำนวณหาค่า $h_H$ จาก

$$h_h = \frac{N_{UL}k}{L}$$

ดังนั้น

$$h_h = \frac{126.73\times0.0465 w/m\ .K}{1.98m} = 2.980\ w/m^2.K$$

คำนวณหาค่า F จาก

$$F_{ij} = \frac{2}{\pi XY}\left\{\ln\left[\frac{\left(1+X^2\right)\left(1+Y^2\right)}{1+X^2+Y^2}\right]^{1/2} + X\left(1+Y^2\right)^{1/2}\tan^{-1}\frac{X}{\left(1+Y^2\right)^{1/2}} + Y\left(1+X^2\right)^{1/2} - X\tan^{-1}X - Y\tan^{-1}Y\right\}$$

$$X = \frac{C}{A},\ Y = \frac{B}{A}$$

เมื่อ $C = 1.98$ m , $B = 1.22$ m , $A = 1$ m

$X = 1.98$ , $Y = 1.22$

ดังนั้นเมื่อแทนค่าจะได้ $F = 0.33$

คำนวณหาค่า $Q_h$ จาก

$$Q_h = \sigma A_h \varepsilon_h F(T^4_h - T^4_a) + h_h A_h (T_h - T_a)$$

ดังนั้น

$$Q_h = (5.676\times10^{-8}\ w/m^2.K^4)(0.0882m^2)(0.69)(0.33)(1023^4K^4 - 306^4K^4)$$
$$+(2.980\ w/m^2.K)(0.0882m^2)(1023K - 306K) = 1426.93\ w$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณหาความร้อนที่สูญเสียจากแผงรับแสงอาทิตย์($Q_L$)

ผลที่ได้จากการทดลองที่ความสูงของแผงให้ความร้อน 1 m ที่ความเร็วลม 5 m/s

$T_w = 320$ K

$T_a = 305$ K

$$T_f = \frac{320K + 306K}{2} = 313K$$

เมื่อ $T_F$ อุณหภูมิฟิล์มของผิวด้านบนกระจก (องศาเคลวิน)

สมบัติต่างๆของอากาศ ที่ $T_F$

$\rho = 1.1269 \quad kg/m^3$

$\mu = 1.9541 \times 10^{-5}$ kg/m.s

$C_P = 1007.32 \quad J/kg.K$

$k = 0.0257 \quad w/m.K$

$N_{Pr} = 0.7548$

คำนวณหาค่า $N_{Re}$ จาก

$$N_{Re} = \frac{L\ U_{AVG}\ \rho}{\mu}$$

ดังนั้น

$$N_{Re} = \frac{1.98m \times 1.96m/s \times 1.1269kg/m^3}{1.9541 \times 10^{-5} kg/m.s} = 223799.88$$

เนื่องจาก $N_{Re} < 5 \times 10^5$ เป็นการไหลของอากาศแบบลามินาร์

คำนวณหาค่า $N_{UL}$ ดังนั้น

$$N_{UL} = 0.664(N_{Re})^{1/2}(N_{Pr})^{1/3}$$

ดังนั้น

$$N_{UL} = 0.664(223799.88)^{1/2}(0.7548)^{1/3} = 237.79$$

คำนวณหาค่า $h_h$ จาก

$$h_h = \frac{N_{UL}\,k}{L}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น

$$h_H = \frac{237.79 \times 0.0257 w/m.K}{1.98m} = 3.13 \ w/m^2.K$$

คำนวณค่า $Q_L$ จากสมการ(2.7)

$$Q_L = h_w A_c (T_w - T_a) + \sigma A_c \varepsilon_w (T^4_w - T^4_a)$$

ดังนั้น

$$Q_L = (3.13 \ w/m^2.K)(2.415m^2)(320-32) + (5.676 \times 10^{-8} \ w/m^2.K^4)(2.415m^2)(0.94)$$
$$X(320^4K^4 - 306^4K^4) = 325.78 \ w$$

คำนวณหาค่า $Q_U$ จากสมการ(2.11)

$$Q_U = Q_h(\tau\alpha) - Q_L - Q_S$$

ดังนั้น

$$Q_U = (1426.93 \ w)(0.92) - (325.78 \ w) = 986.987 \ w$$

คำนวณหาประสิทธิภาพทางทฤษฎีของแผงรับแสงอาทิตย์จากสมการ(2.15)

$$\eta_T = \frac{Q_U \times 100}{Q_h}$$

ดังนั้น

$$\eta_T = \frac{986.987w \times 100}{142.93w} = 69.16 \ \%$$

คำนวณหาประสิทธิภาพที่แท้จริงของแผงรับแสงอาทิตย์จากสมการ(2.16)

$$\eta_R = \frac{m C_{p,avg} (T_{out} - T_{in}) \times 100}{Q_h}$$

$T_{in}$ = 304 K

$T_{out}$ = 317 K

สมบัติต่างๆของอากาศ

$C_{p,in}$ = 1008.84 J/kg.K

$C_{p,out}$ = 1008.32 J/kg.K

$\rho$ = 1.16 $kg/m^3$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$C_{p,avg} = \frac{1008.84\ J/kg.K + 1008.32\ J/kg.K}{2} = 1008.58\ J/kg.K$$

หาค่า m จาก

$$m = \rho V_b A_g$$

$V_b = 5$ m/s

$A_g = 0.008\ m^2$

ดังนั้น

$$m = (1.153\ kg/m^3)(5\ m/s)(0.008\ m^2) = 0.04612\ kg/s$$

แทนค่าหาประสิทธิภาพ

$$\eta_R = \frac{(0.04612 kg/s)(1007.28 J/kg.K)(317K-304K)\times 100}{1426.93w}$$

$$= 41.90\ \%$$

## ก.2 ตัวอย่างการคำนวณเปอร์เซ็นต์ความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือก

ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ

น้ำหนักที่ชั่งก่อนเข้าคอลัมน์อบแห้ง 2600 กรัม

น้ำหนักแห้งสุทธิเฉลี่ย 1998.6 กรัม

เปอร์เซ็นต์ความชื้นในเมล็ดข้าวเปลือก $= \frac{2600 - 1998.6}{1998.6} \times 100$

$= 30\ \%$

การทดลองอบแห้งที่ความเร็วลม 15 เมตร/วินาที ที่ความสูงของแผงให้ความร้อน 1 เมตร

น้ำหนักที่ชั่งหลังจากที่ผ่านการอบแห้ง 2554.2 กรัม

เปอร์เซ็นต์ความชื้นที่หายไปในเมล็ดข้าวเปลือก $= \frac{2554.2 - 1998.6}{1998.6} \times 100$

$= 27.8\ \%$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ภาคผนวก ข

# ค่าพลังงานแสงอาทิตย์ประจำปี พ.ศ. 2540

**ตารางที่ ข.1** ค่าพลังงานแสงอาทิตย์ประจำปี พ.ศ. 2540 [7]

| เดือน | ความเข้มแสง (cal/cm$^2$)/day | | | ความยาวนานของแสง hour/day | | | พลังงานสูงสุดของแสง (W/m$^2$) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | ค่าสูงสุด | ค่าต่ำสุด | ค่าเฉลี่ย | ค่าสูงสุด | ค่าต่ำสุด | ค่าเฉลี่ย | |
| ม.ค. | 384.56 | 253.14 | 341.18 | 9.83 | 0.00 | 7.50 | 595.81 |
| ก.พ. | 471.44 | 189.19 | 390.72 | 10.00 | 0.08 | 7.87 | 696.08 |
| มี.ค. | 511.57 | 244.54 | 432.80 | 9.17 | 2.83 | 8.09 | 734.79 |
| เม.ย. | 543.10 | 185.44 | 381.90 | 11.75 | 1.08 | 6.38 | 989.16 |
| พ.ค. | 542.88 | 144.87 | 382.95 | 10.33 | 2.92 | 6.86 | 919.57 |
| มิ.ย. | 537.59 | 170.67 | 338.83 | 10.00 | 0.67 | 6.18 | 1010.81 |
| ก.ค. | 479.82 | 122.16 | 357.56 | 8.50 | 0.00 | 3.98 | 1400.88 |
| ส.ค. | 509.80 | 173.32 | 301.64 | 10.00 | 0.00 | 4.98 | 1189.53 |
| ก.ย. | 449.39 | 137.37 | 326.99 | 7.58 | 0.00 | 3.04 | 1717.73 |
| ต.ค. | 474.52 | 113.34 | 333.38 | 9.00 | 0.00 | 4.16 | 1196.08 |
| พ.ย. | 436.16 | 160.31 | 333.38 | 10.00 | 0.00 | 5.98 | 847.52 |
| ธ.ค. | 427.78 | 217.64 | 336.67 | 8.08 | 1.17 | 6.88 | 722.50 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ภาคผนวก ค

# ผลการทดลอง

## ค.1 ศึกษาการหาประสิทธิภาพของแผงรับแสงอาทิตย์

**ตารางที่ ค 1.1** การทดลองหาความร้อนของแผงให้ความร้อนความสูงจากระนาบแผง 1 เมตร

| $T_h$ (°C) | $T_a$ (°C) | $T_{fh}$ (°C) | $Q_h$ (W) |
|---|---|---|---|
| 750 | 33 | 391.5 | 1426.93 |
| 750 | 33 | 391.5 | 1426.93 |
| 750 | 32 | 391.0 | 1428.16 |
| 750 | 34 | 391.5 | 1426.93 |
| 750 | 34 | 392.0 | 1427.36 |
| 750 | 34 | 392.0 | 1427.36 |

**ตารางที่ ค 1.2** การทดลองหาความร้อนจากแผงให้ความร้อนความสูงจากระนาบแผง 0.9 เมตร

| $T_h$ (°C) | $T_a$ (°C) | $T_{fh}$ (°C) | $Q_h$ (W) |
|---|---|---|---|
| 750 | 34 | 392.0 | 1498.20 |
| 750 | 34 | 392.0 | 1498.20 |
| 750 | 34 | 392.0 | 1498.20 |
| 750 | 35 | 392.5 | 1496.42 |
| 750 | 35 | 392.5 | 1496.42 |
| 750 | 35 | 392.5 | 1496.42 |

$T_h$ อุณหภูมิของแผงให้ความร้อน(องศาเคลวิน)

$T_a$ อุณหภูมิของอากาศรอบๆแผงรับแสงอาทิตย์(องศาเคลวิน)

$T_{fh}$ อุณหภูมิฟิล์มของแผงให้ความร้อน(องศาเคลวิน)

$Q_h$ ค่าพลังงานความร้อนของแผงให้ความร้อนที่ได้จากการคำนวณ(วัตต์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ ค 1.3** การทดลองหาความร้อนจากแผงให้ความร้อนความสูงจากระนาบแผง0.85 เมตร

| $T_h$ (°C) | $T_a$ (°C) | $T_{fh}$ (°C) | $Q_h$ (W) |
|---|---|---|---|
| 750 | 34 | 392..0 | 1577.03 |
| 750 | 35 | 392.5 | 1574.95 |
| 750 | 37 | 393.5 | 1573.92 |
| 750 | 37 | 393.5 | 1573.92 |
| 750 | 37 | 393.5 | 1573.92 |
| 750 | 37 | 393.5 | 1573.92 |

**ตารางที่ ค 1.4** การหาประสิทธิภาพแผงรับแสงอาทิตย์ที่ความสูงของแผงให้ความร้อน 1 เมตร

| $V_b$ (m/s) | $T_w$ (°C) | $T_{in}$ (°C) | $T_{out}$ (°C) | $T_a$ (°C) | $\eta_T$ (%) | $\eta_R$ (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 5 | 47 | 31 | 44 | 33 | 69.16 | 41.97 |
| 8 | 48 | 33 | 40 | 33 | 67.45 | 35.93 |
| 10 | 49 | 32 | 37 | 32 | 64.20 | 32.12 |
| 12 | 52 | 32 | 36 | 33 | 60.50 | 30.86 |
| 15 | 52 | 32 | 35 | 34 | 62.10 | 28.89 |
| 18 | 52 | 32 | 34 | 34 | 62.10 | 23.11 |

$\eta_T$ ประสิทธิภาพทางทฤษฎี

$\eta_R$ ประสิทธิภาพจริง

$V_b$ ความเร็วลมของพัดลมดูดอากาศ(เมตร/วินาที)

$T_w$ อุณหภูมิที่ผิวกระจก(องศาเคลวิน)

$T_{in}$ อุณหภูมิของกาศที่ถูกพัดลมดูดอากาสดูดเข้าไปในแผง(องศาเคลวิน)

$T_{out}$ อุณหภูมิของอากาศร้อนที่ออกจากแผงรับแสงอาทิตย์(องศาเคลวิน)

$T_a$ อุณหภูมิของอากาศรอบๆแผงรับแสงอาทิตย์(องศาเคลวิน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ ค 1.5** การหาประสิทธิภาพแผงรับแสงอาทิตย์ที่ความสูงของแผงให้ความร้อน 0.9 เมตร

| $V_b$ (m/s) | $T_w$ (°C) | $T_{in}$ (°C) | $T_{out}$ (°C) | $T_a$ (°C) | $\eta_T$ (%) | $\eta_R$ (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 5 | 52 | 32 | 46 | 34 | 63.48 | 42.91 |
| 8 | 52 | 34 | 42 | 34 | 63.48 | 38.93 |
| 10 | 55 | 34 | 40 | 34 | 58.40 | 36.55 |
| 12 | 55 | 34 | 39 | 35 | 59.86 | 36.47 |
| 15 | 56 | 35 | 39 | 35 | 58.15 | 36.47 |
| 18 | 56 | 35 | 38 | 35 | 58.15 | 32.82 |

**ตารางที่ ค 1.6** การหาประสิทธิภาพแผงรับแสงอาทิตย์ที่ความสูงของแผงให้ความร้อน 0.85 เมตร

| $V_b$ (m/s) | $T_w$ (°C) | $T_{in}$ (°C) | $T_{out}$ (°C) | $T_a$ (°C) | $\eta_T$ (%) | $\eta_R$ (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 5 | 55 | 32 | 47 | 34 | 59.39 | 43.67 |
| 8 | 55 | 35 | 44 | 35 | 60.80 | 41.59 |
| 10 | 49 | 37 | 44 | 37 | 56.90 | 40.21 |
| 12 | 49 | 37 | 43 | 37 | 56.90 | 41.36 |
| 15 | 49 | 37 | 42 | 37 | 56.90 | 34.46 |
| 18 | 49 | 37 | 41 | 37 | 56.90 | 41.35 |

$\eta_T$ ประสิทธิภาพทางทฤษฎี

$\eta_R$ ประสิทธิภาพจริง

$V_b$ ความเร็วลมของพัดลมดูดอากาศ(เมตร/วินาที)

$T_w$ อุณหภูมิที่ผิวกระจก(องศาเคลวิน)

$T_{in}$ อุณหภูมิของกาศที่ถูกพัดลมดูดอากาสดูดเข้าไปในแผง(องศาเคลวิน)

$T_{out}$ อุณหภูมิของอากาศร้อนที่ออกจากแผงรับแสงอาทิตย์(องศาเคลวิน)

$T_a$ อุณหภูมิของอากาศรอบๆแผงรับแสงอาทิตย์(องศาเคลวิน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ค.2 ผลการทดลองหาน้ำหนักแห้งสุทธิของเมล็ดข้าวเปลือก

**ตารางที่ ค 2.1** ผลการทดลองหาน้ำหนักแห้งสุทธิของเมล็ดข้าวเปลือก

| ครั้งที่ | น้ำหนักก่อนเข้าตู้อบ (กรัม) | น้ำหนักแห้งสุทธิ (กรัม) |
|---|---|---|
| 1 | 2600 | 2004.8 |
| 2 | 2600 | 1997.4 |
| 3 | 2600 | 1993.7 |
| เฉลี่ย | | 1998.6 |

**ตารางที่ ค 2.2** ผลการหาเปอร์เซ็นต์ความชื้นที่เหลือในเมล็ดข้าวเปลือกที่ระดับความสูงแผงให้ความร้อน 1 เมตร

| V (m/s) | เวลาที่ใช้ในการอบ (ชั่วโมง) | T1 (°C) | T2 (°C) | H1 (%RH) | H2 (%RH) | น้ำหนักก่อนเข้าคอลัมน์ (กรัม) | น้ำหนักออกจากคอลัมน์ (กรัม) | %ความชื้นที่เหลือในเมล็ดข้าวเปลือก |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 15 | 0.12 | 35 | 33 | 55.4 | 56.2 | 2600 | 2554.2 | 27.8 |
| 12 | 3.31 | 36 | 34 | 52.3 | 56.8 | 2554.2 | 2447.7 | 22.5 |
| 10 | 6.22 | 37 | 35 | 51.1 | 63.3 | 2447.7 | 2315.6 | 15.9 |
| 8 | 7.36 | 40 | 37 | 50.8 | 63.2 | 2315.6 | 2236.3 | 11.9 |

ความสูงของเบด 28.5 เซนติเมตร

อุณหภูมิห้องเริ่มต้นที่ทำการทดลอง 35.5 องศาเซลเซียส

เปอร์เซ็นต์ความชื้นในอากาศ 56.20 %RH

เปอร์เซ็นต์ความชื้นเริ่มต้นในเมล็ดข้าวเปลือกเท่ากับ 30.09 เปอร์เซ็นต์

ทดลองวันที่ 1 พฤษภาคม 2549

หมายเหตุ

T1 คือ อุณหภูมิอากาศร้อนก่อนเข้าคอลัมน์ (องศาเซลเซียส)

T2 คือ อุณหภูมิอากาศร้อนออกจากคอลัมน์ (องศาเซลเซียส)

H1 คือ เปอร์เซ็นต์ความชื้นอากาศร้อนก่อนเข้าคอลัมน์

H2 คือ เปอร์เซ็นต์วามชื้นอากาศร้อนออกจากคอลัมน์

V คือ ความเร็วลมที่ใช้อบแห้งในคอลัมน์ (เมตร/วินาที)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ ค 2.3** ผลการหาเปอร์เซ็นต์ความชื้นที่เหลือในเมล็ดข้าวเปลือกที่ระดับความสูงแผงให้ความร้อน 0.9 เมตร

| V (m/s) | เวลาที่ใช้ในการอบ (ชั่วโมง) | T1 (°C) | T2 (°C) | H1 (%RH) | H2 (%RH) | น้ำหนักก่อนเข้าคอลัมน์ (กรัม) | น้ำหนักออกจากคอลัมน์ (กรัม) | %ความชื้นที่เหลือในเมล็ดข้าวเปลือก |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 15 | 0.11 | 39 | 37 | 53.8 | 56.4 | 2600 | 2547.6 | 27.5 |
| 12 | 2.45 | 39 | 36 | 53.5 | 68.4 | 2547.6 | 2417.1 | 20.9 |
| 10 | 4.36 | 40 | 39 | 56.7 | 67.5 | 2417.1 | 2308.4 | 15.5 |
| 8 | 4.56 | 42 | 40 | 56.8 | 67.9 | 2308.4 | 2214.8 | 10.8 |

ความสูงของเบด 28.4 เซนติเมตร

อุณหภูมิห้องเริ่มต้นที่ทำการทดลอง 36.3 องศาเซลเซียส

เปอร์เซ็นต์ความชื้นในอากาศ 56.95 %RH

เปอร์เซ็นต์ความชื้นเริ่มต้นในเมล็ดข้าวเปลือกเท่ากับ 30.09 เปอร์เซ็นต์

ทดลองวันที่ 6 พฤษภาคม 2549

หมายเหตุ

T1 คือ อุณหภูมิอากาศร้อนก่อนเข้าคอลัมน์ (องศาเซลเซียส)

T2 คือ อุณหภูมิอากาศร้อนออกจากคอลัมน์ (องศาเซลเซียส)

H1 คือ เปอร์เซ็นต์ความชื้นอากาศร้อนก่อนเข้าคอลัมน์

H2 คือ เปอร์เซ็นต์วามชื้นอากาศร้อนออกจากคอลัมน์

V คือ ความเร็วลมที่ใช้อบแห้งในคอลัมน์ (เมตร/วินาที)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ ค 2.4** ผลการหาเปอร์เซ็นต์ความชื้นที่เหลือในเมล็ดข้าวเปลือกที่ระดับความสูงแผงให้ความร้อน 0.85 เมตร

| V (m/s) | เวลาที่ใช้ในการอบ (ชั่วโมง) | T1 (°C) | T2 (°C) | H1 (%RH) | H2 (%RH) | น้ำหนักก่อนเข้าคอลัมน์ (กรัม) | น้ำหนักออกจากคอลัมน์ (กรัม) | %ความชื้นที่เหลือในเมล็ดข้าวเปลือก |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 15 | 0.10 | 42 | 41 | 65.4 | 66.7 | 2600 | 2545.4 | 27.4 |
| 12 | 2.06 | 43 | 41 | 66.3 | 68.1 | 2545.4 | 2423.8 | 21.3 |
| 10 | 3.14 | 44 | 42 | 62.6 | 64.6 | 2423.8 | 2284.7 | 14.3 |
| 8 | 4.22 | 44 | 42 | 61.7 | 64.3 | 2284.7 | 2193.3 | 9.7 |

ความสูงของเบด 28.5 เซนติเมตร

อุณหภูมิห้อง 34.30 องศาเซลเซียส

เปอร์เซ็นต์ความชื้นในอากาศ 60.05 %RH

เปอร์เซ็นต์ความชื้นเริ่มต้นในเมล็ดข้าวเปลือกเท่ากับ 30.09 เปอร์เซ็นต์

ทดลองวันที่ 10 พฤษภาคม 2549

หมายเหตุ

T1 คือ อุณหภูมิอากาศร้อนก่อนเข้าคอลัมน์ (องศาเซลเซียส)

T2 คือ อุณหภูมิอากาศร้อนออกจากคอลัมน์ (องศาเซลเซียส)

H1 คือ เปอร์เซ็นต์ความชื้นอากาศร้อนก่อนเข้าคอลัมน์

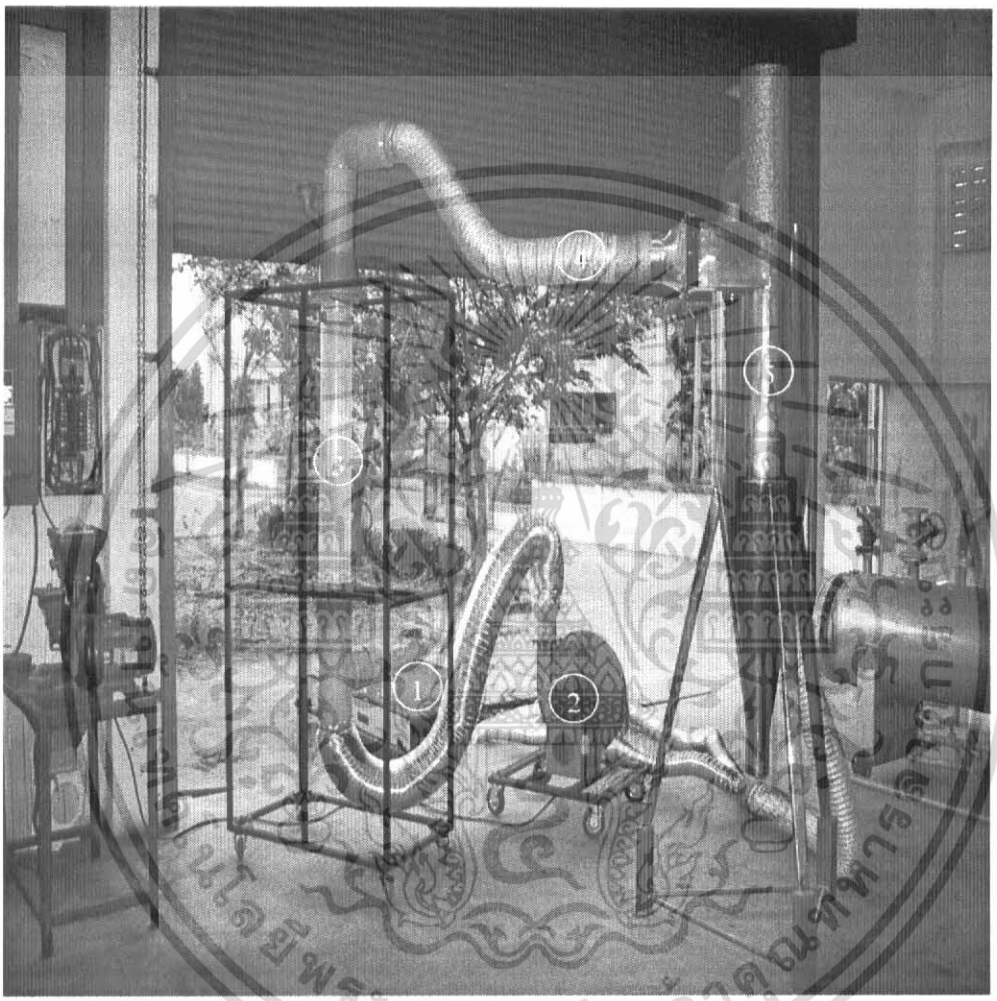
H2 คือ เปอร์เซ็นต์วามชื้นอากาศร้อนออกจากคอลัมน์

V คือ ความเร็วลมที่ใช้อบแห้งในคอลัมน์ (เมตร/วินาที)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

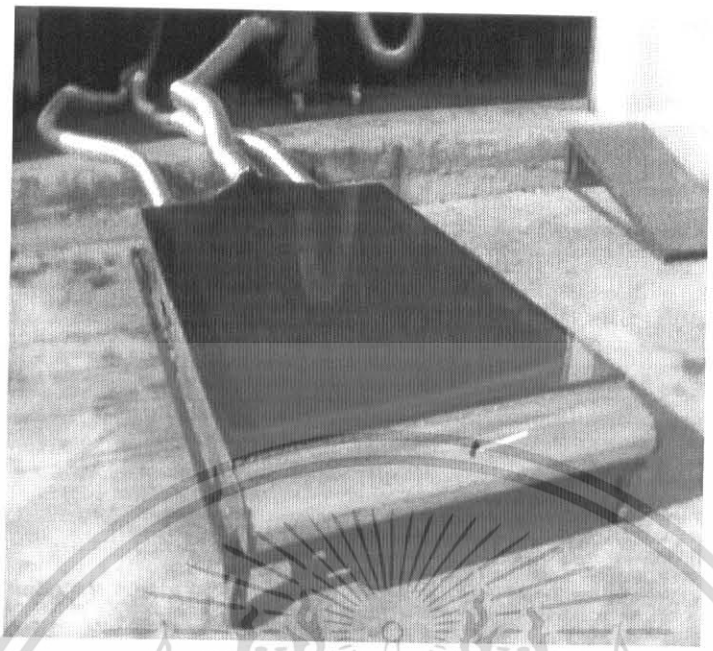
# ภาคผนวก ง
# เครื่องเก็บความร้อนจากแสงอาทิตย์สำหรับการอบแห้งธัญพืช

## ง.1 เครื่องเก็บความร้อนจากแสงอาทิตย์สำหรับการอบแห้งธัญพืช

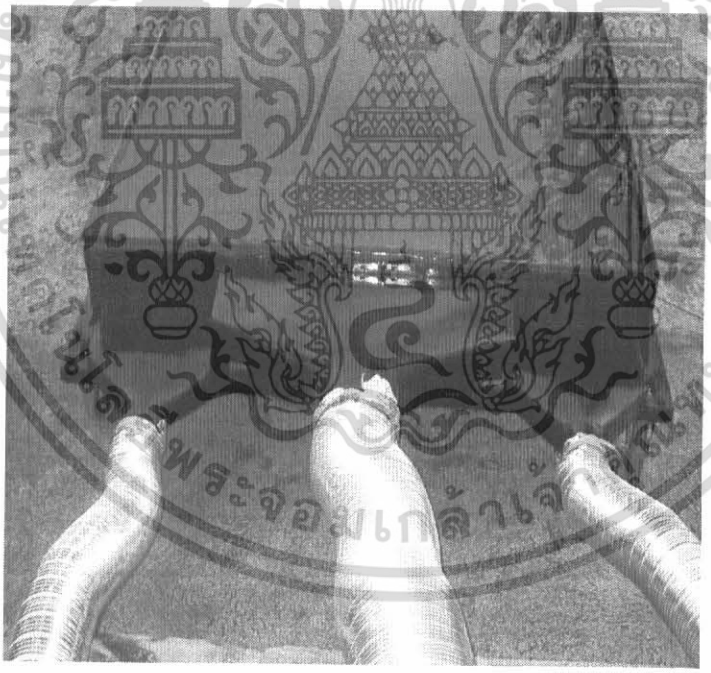



**รูปที่ ง 1.1** เครื่องเก็บความร้อนจากแสงอาทิตย์สำหรับการอบแห้งธัญพืช
1. แผงรับแสงอาทิตย์ 2. พัดลมดูดอากาศ 3. คอลัมน์อบแห้ง 4. ท่อฟอยล์ 5. ไซโคลน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

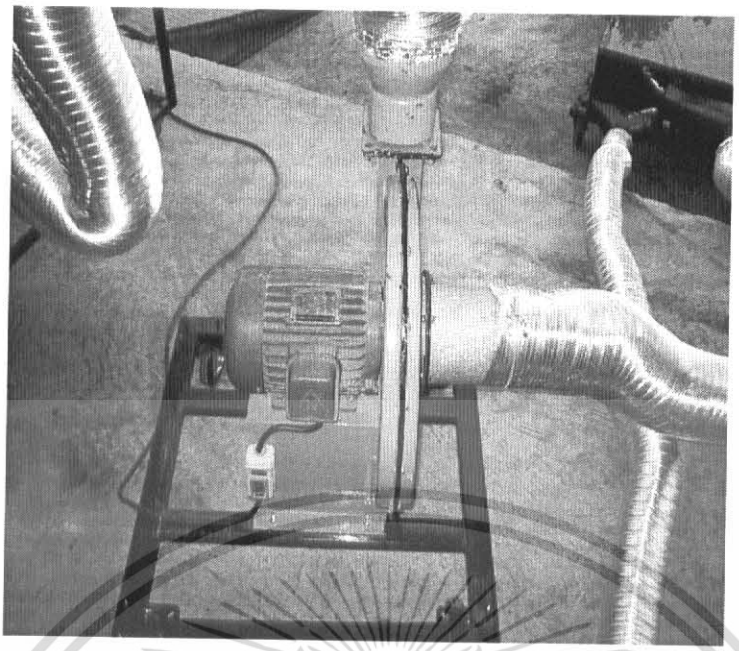


**รูปที่ ง 1.2** แผงรับพลังงานแสงอาทิตย์

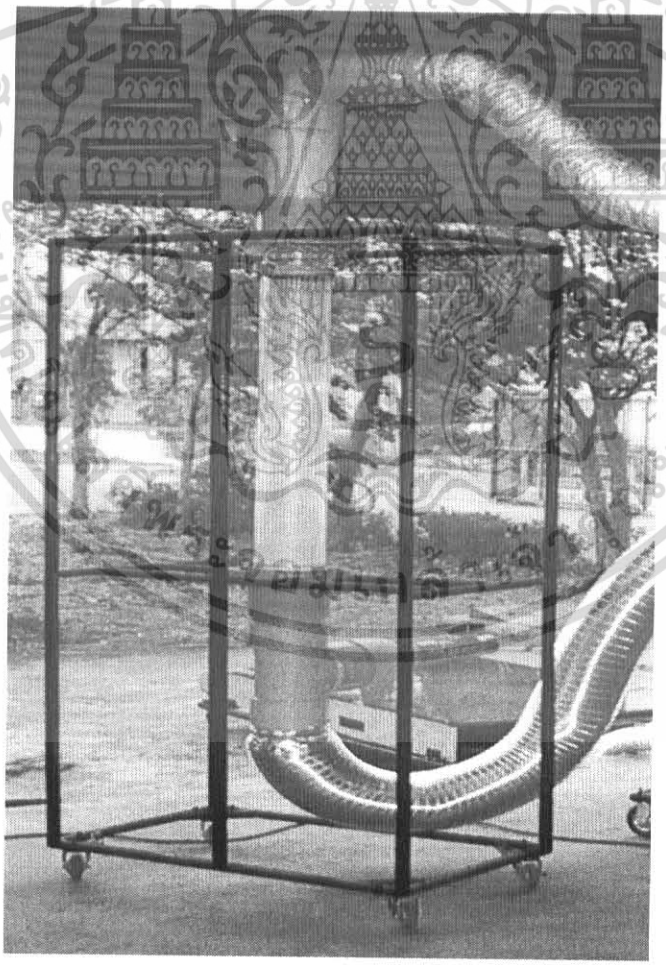


**รูปที่ ง 1.3** ลักษณะของท่อทางไหลของลมร้อนและท่อลมนำกลับมาหมุนเวียนใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

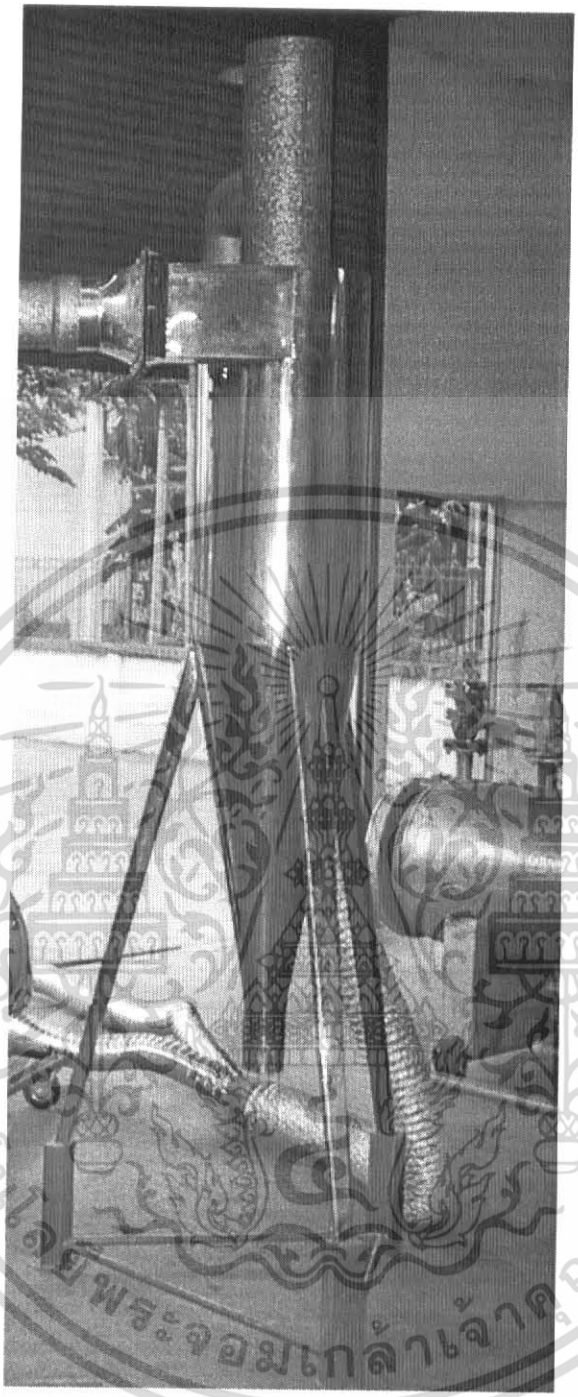


**รูปที่ ง 1.4** พัดลมดูดอากาศและอุปกรณ์สวิตซ์เปิด-ปิด



**รูปที่ ง 1.5** คอลัมน์อบแห้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ ง 1.6** ไซโคลน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้