

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกักเก็บความร้อนของเครื่องกักเก็บ  
ความร้อนจากแสงอาทิตย์ชนิดหลอดสุญญากาศระหว่างกรณีที่ใช้  
วัสดุเปลี่ยนสถานะกับไม่ใช้วัสดุเปลี่ยนสถานะเป็นวัสดุกักเก็บความร้อน



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2561

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกักเก็บความร้อนของเครื่องกักเก็บ  
ความร้อนจากแสงอาทิตย์ชนิดหลอดสุญญากาศระหว่างกรณีที่ใช้  
วัสดุเปลี่ยนสถานะกับไม่ใช้วัสดุเปลี่ยนสถานะเป็นวัสดุกักเก็บความร้อน



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ENERGY STORAGE EFFICIENCY OF EVACUATED TUBE SOLAR COLLECTOR  
USING AND WITHOUT USING PHASE CHANGE MATERIALS  
AS AN ENERGY STORAGE



A REPORT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT  
FOR THE DEGREE OF BACHELOR IN CHEMICAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC YEAR 2018

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกักเก็บความร้อนของเครื่องกักเก็บความร้อนจากแสงอาทิตย์ชนิดหลอดสุญญากาศระหว่างกรณีที่ใช้วัสดุเปลี่ยนสถานะกับไม่ใช้วัสดุเปลี่ยนสถานะเป็นวัสดุกักเก็บความร้อน

โดย นางสาวศุภาวรรณ ท้าวฤทธิ์

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.วลัยรัตน์ จันทระอัมพร

สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปริญญานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญานิพนธ์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง	การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกักเก็บความร้อนของเครื่องกักเก็บความร้อนจากแสงอาทิตย์ชนิดหลอดสุญญากาศระหว่างกรณีที่ใช้วัสดุเปลี่ยนสถานะกับไม่ใช้วัสดุเปลี่ยนสถานะเป็นวัสดุกักเก็บความร้อน
โดย	นางสาวศุภาวรรณ ท้าวฤทธิ์
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตร์
สาขา	วิศวกรรมเคมี
ปีการศึกษา	2561
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.วัลย์รัตน์ จันทรัมย์พร

### บทคัดย่อ

ระบบกักเก็บพลังงานความร้อนที่นิยมใช้อย่างแพร่หลาย คือ ระบบกักเก็บพลังงานความร้อนแฝงการหลอมเหลว โดยการใช้วัสดุเปลี่ยนสถานะ (Phase change material) เป็นวัสดุกักเก็บพลังงานความร้อน งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการกักเก็บความร้อนของวัสดุเปลี่ยนสถานะสองชนิด คือ พาราฟินและไฮคาร์บอนา สำหรับใช้งานในเครื่องกักเก็บความร้อนจากแสงอาทิตย์ชนิดหลอดสุญญากาศภายใต้สภาพอากาศของประเทศ และเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกักเก็บความร้อนของเครื่องกักเก็บความร้อนจากแสงอาทิตย์ชนิดหลอดสุญญากาศระหว่างกรณีที่ใช้วัสดุเปลี่ยนสถานะกับไม่ใช้วัสดุเปลี่ยนสถานะเป็นวัสดุกักเก็บความร้อน โดยการนำวัสดุเปลี่ยนสถานะทั้งสองอย่างละ 200 กรัม แคล่งในน้ำมันพาราฟิน แล้วตั้งค่าอุปกรณ์ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส แล้ววัดอุณหภูมิของวัสดุเปลี่ยนสถานะและเมื่อวัสดุเปลี่ยนสถานะหลอมเหลวหมด จะหยุดให้ความร้อน เพื่อสังเกตลักษณะการหลอมเหลวและการถ่ายเทความร้อนของวัสดุเปลี่ยนสถานะ พบว่าเวลาที่พาราฟินและไฮคาร์บอนาหลอมเหลวหมด คือ 1 และ 3 ชั่วโมง ตามลำดับ และเวลาที่พาราฟินและไฮคาร์บอนากลับมาเป็นของแข็งจนหมด คือ 5 และ 4 ชั่วโมง ตามลำดับ หลังจากนั้นทำการใส่พาราฟิน 1 และ 2 กิโลกรัมลงในถังกักเก็บสาร แล้ววัดอุณหภูมิของโพพิลีนไกลคอลที่เป็นสารกักเก็บความร้อนภายในถังกักเก็บสารเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ซึ่งในช่วงกลางวันจะปั๊มโพพิลีนไกลคอลที่อัตราการไหล 100 กิโลกรัมต่อชั่วโมงผ่านท่อกักเก็บความร้อนจากแสงอาทิตย์ชนิดหลอดสุญญากาศ เพื่อกักเก็บความร้อนที่ได้จากแสงอาทิตย์ และในช่วงกลางคืนจะหยุดการปั๊มโพพิลีนไกลคอลผ่านท่อกักเก็บความร้อนจากแสงอาทิตย์ชนิดหลอดสุญญากาศ พบว่าเมื่อผ่านไป 24 ชั่วโมง อุณหภูมิของโพพิลีนไกลคอลกรณีที่ไม่ได้ใส่พาราฟิน ใส่พาราฟิน 1 กิโลกรัม และใส่พาราฟิน 2 กิโลกรัมลงในถังกักเก็บสารมีค่าเท่ากับ 39.2 45.7 และ 46.5 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งกรณีที่ใส่พาราฟิน 2 กิโลกรัมลงในถังกักเก็บสารสามารถรักษาอุณหภูมิไว้ได้สูงที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และห้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Project Title** Energy Storage Efficiency of Evacuated Tube Solar Collector Using and without Using Phase Change Materials as an Energy Storage  
**By** Miss Supawan Thowrit  
**Degree** Bachelor of Engineering  
**Program** Chemical Engineering  
**Year** 2018  
**Advisor** Assist.Prof.Dr. Walairat Chandra-ambhorn

### Abstract

The widely used thermal energy storage system is a latent heat storage system that uses phase change materials for storing thermal energy. The objectives of this research are to compare energy storage efficiency of phase change materials between paraffin wax and carnauba wax for using in evacuated tube solar collector under Thailand's climate and compare energy storage efficiency of evacuated tube solar collector using and without using phase change materials as an energy storage. Therefore, we experimented with two phase change materials by immersing each 200 g into paraffin oil at 100 °C and then measuring the temperature of phase change materials. When all of them were melted, we stopped heating paraffin oil to observe their melting characteristics and heat transfer. All paraffin wax and carnauba wax spent 1 and 3 hr for melting and 5 and 4 hr for freezing, respectively. Subsequently, put 1 kg of phase change materials into the storage tank and measure the temperature of propylene glycol inside the storage tank for 24 hr. During the day, propylene glycol was pumped through evacuated tube solar collector at 100 kg/hr and stopped during the night. The results showed that the temperatures of propylene glycol in case of not putting paraffin, putting 1 kg of paraffin and 2 kg of paraffin were 39.2, 45.7 and 46.5 oC, respectively. In conclusion, the highest temperature was kept at the condition of putting 2 kg of paraffin into the storage tank.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาบัตรฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากผศ.ดร.วัลย์รัตน์ จันทรัมย์ อาจารย์ที่  
ปรึกษาปริญญาบัตร ที่คอยให้คำแนะนำ ความช่วยเหลือ ความเมตตา ตลอดจนถ่ายทอด  
ประสบการณ์ที่ดี

ขอขอบคุณรศ.ดร.ดวงกมล ณ ระนอง และผศ.ดร.อภิรักษ์ นัมคณิสร์ กรรมการตรวจสอบ  
ปริญญาบัตรที่ให้คำแนะนำในการสอบปริญญาบัตร ตลอดจนคำชี้แนะในการเขียนปริญญาบัตร  
ฉบับนี้ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณคณาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบัน  
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ถ่ายทอดความรู้เทคนิค และประสบการณ์ทาง  
วิศวกรรมศาสตร์

กราบขอพระคุณบิดา มารดา ที่คอยให้กำลังใจ และให้การสนับสนุนในทุก ๆ ด้าน ผู้ศึกษา  
รู้สึกซาบซึ้งและสำนึกในพระคุณจากท่านทั้งสองอย่างยิ่ง

ขอบคุณเพื่อนร่วมชั้นเรียนภาควิชาวิศวกรรมเคมีทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือ และมีส่วนทำ  
ให้ปริญญาบัตรฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี

ศภาวรรณ ท้าวฤทธิ์

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	II
กิตติกรรมประกาศ .....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูปภาพ.....	VII
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญของปริญญาโท.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญาโท.....	2
1.3 ขอบเขตของปริญญาโท.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีเบื้องต้นและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 การถ่ายเทความร้อน.....	3
2.1.1 การนำความร้อนแบบไม่คงตัวในทรงกระบอกแบบหนึ่งมิติ.....	3
2.2 เครื่องกักเก็บความร้อนจากแสงอาทิตย์ชนิดหลอดสุญญากาศ.....	5
2.2.1 หลักการทำงานของเครื่องกักเก็บความร้อนจากแสงอาทิตย์ ชนิดหลอดสุญญากาศ.....	7
2.2.2 ประเภทของเครื่องกักเก็บความร้อน.....	8
2.2.3 การคำนวณประสิทธิภาพของเครื่องกักเก็บความร้อนจากแสงอาทิตย์ ชนิดหลอดสุญญากาศ.....	8
2.2.4 ประโยชน์ของเครื่องกักเก็บความร้อนจากแสงอาทิตย์ ชนิดหลอดสุญญากาศ.....	9
2.3 วัสดุเปลี่ยนสถานะ.....	12
2.3.1 ประเภทของวัสดุเปลี่ยนสถานะ.....	13
2.4 พาราฟิน (Paraffin wax).....	13
2.5 ไชคาร์นوبا (Carnauba wax).....	14
บทที่ 3 การดำเนินงาน	
3.1 การสังเกตลักษณะการหลอมเหลวและการถ่ายเทความร้อนของวัสดุเปลี่ยนสถานะ.....	16
3.2 ระบบกักเก็บความร้อนของพาราฟิน เมื่อนำพาราฟินใส่ลงในถังกักเก็บสาร.....	17
3.3 การตรวจวัดค่าคุณสมบัติทางความร้อนของไชคาร์นوبا.....	18

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง	
4.1 ผลการวิเคราะห์ค่าความร้อนแฝงการหลอมเหลวของไซคาร์บอนา.....	19
4.2 การหาเวลาที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิวัสดุเปลี่ยนสถานะจนถึงจุดหลอมเหลว ณ จุดกึ่งกลางของวัสดุ .....	20
4.3 การสังเกตลักษณะการหลอมเหลวและการถ่ายเทความร้อนของวัสดุเปลี่ยนสถานะ	22
4.4 ระบบกักเก็บความร้อนของพาราฟิน เมื่อนำพาราฟินใส่ลงในถังกักเก็บสาร.....	25
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการวิจัย .....	27
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	27
เอกสารอ้างอิง .....	28
ภาคผนวก .....	30
ภาคผนวก ก ข้อมูลดิบ .....	43
ภาคผนวก ข ข้อมูลการวิเคราะห์ผล.....	37
ภาคผนวก ค เครื่องมือวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของสาร (Differential scanning calorimetry, DSC) .....	44

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 2.1 ค่า $A_1$ และ $\lambda_1$ ของรูปทรงต่าง ๆ.....	5
ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของพาราฟิน.....	14
ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติของไฮคาร์บอนา.....	15
ตารางที่ 4.1 ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณหาเวลาที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิวัสดุเปลี่ยนสถานะจนถึง จุดหลอมเหลว เมื่อโพรพิลีน ไกลคอลถ่ายเทความร้อนให้กับวัสดุเปลี่ยนสถานะ.....	21
ตารางที่ ก.1 อุณหภูมิของพาราฟิน ณ เวลาต่าง ๆ.....	31
ตารางที่ ก.2 อุณหภูมิของไฮคาร์บอนา ณ เวลาต่าง ๆ.....	34
ตารางที่ ก.3 อุณหภูมิของโพรพิลีน ไกลคอล ณ ช่วงเวลาต่าง ๆ กรณีไม่ได้ใส่พาราฟิน.....	37
ตารางที่ ก.4 อุณหภูมิของโพรพิลีน ไกลคอล ณ ช่วงเวลาต่าง ๆ กรณีใส่พาราฟิน 1 กิโลกรัม.....	39
ตารางที่ ก.5 อุณหภูมิของโพรพิลีน ไกลคอล ณ ช่วงเวลาต่าง ๆ กรณีใส่พาราฟิน 2 กิโลกรัม.....	41



# สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.1 การถ่ายเทความร้อนในทรงกระบอกแบบหนึ่งมิติ.....	3
รูปที่ 2.2 เครื่องกักเก็บความร้อนจากแสงอาทิตย์ชนิดหลอดสุญญากาศ.....	6
รูปที่ 2.3 หลอดสุญญากาศ.....	6
รูปที่ 2.4 หลักการทำงานของเครื่องกักเก็บความร้อนจากแสงอาทิตย์ชนิดหลอดสุญญากาศ.....	7
รูปที่ 2.5 หลักการทำงานของท่อเก็บพลังงานแสงอาทิตย์แบบสุญญากาศ.....	7
รูปที่ 2.6 แผนผังการแบ่งประเภทของเครื่องกักเก็บความร้อนจากแสงอาทิตย์.....	8
รูปที่ 2.7 ประโยชน์ของเครื่องกักเก็บความร้อนจากแสงอาทิตย์ชนิดหลอดสุญญากาศ สำหรับครัวเรือน.....	9
รูปที่ 2.8 พาราฟิน.....	14
รูปที่ 2.9 ไซคาร์บอนา.....	14
รูปที่ 3.1 ชุดการทดลองตรวจสอบจุดหลอมเหลวของวัสดุเปลี่ยนสถานะ.....	17
รูปที่ 3.2 ขวดแก้วที่มีพาราฟิน.....	18
รูปที่ 3.3 เครื่องมือวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของสาร NETZSCH DSC 204 F1 ....	18
รูปที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ไซคาร์บอนาด้วยเครื่องมือวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อน ของสาร NETZSCH DSC 204 F1.....	19
รูปที่ 4.2 ลักษณะการถ่ายเทความร้อนของวัสดุเปลี่ยนสถานะ.....	20
รูปที่ 4.3 กราฟระหว่างอุณหภูมิและเวลาของวัสดุเปลี่ยนสถานะ ณ ตำแหน่งจุดกึ่งกลางของวัสดุ	21
รูปที่ 4.4 กราฟระหว่างอุณหภูมิและเวลาของพาราฟิน.....	22
รูปที่ 4.5 ลักษณะการหลอมเหลวของพาราฟิน.....	23
รูปที่ 4.6 กราฟระหว่างอุณหภูมิและเวลาของไซคาร์บอนา.....	23
รูปที่ 4.7 ลักษณะการหลอมเหลวของไซคาร์บอนา.....	24
รูปที่ 4.8 กราฟอุณหภูมิของโพรพิลีน ไกลคอลในถังกักเก็บสาร.....	25
รูปที่ ข.1 ผลการวิเคราะห์ไซคาร์บอนาด้วยเครื่องมือวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อน ของสาร NETZSCH DSC 204 F1.....	43
รูปที่ ค.1 หลักการทำงานของเครื่องมือวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของสาร.....	45

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของปริญญานิพนธ์

พลังงานทดแทน หมายถึง พลังงานที่นำมาใช้แทนน้ำมันเชื้อเพลิง เช่น พลังงานจากถ่านหิน แก๊สธรรมชาติ แสงอาทิตย์ ลม เป็นต้น และพลังงานทดแทนที่ถูกนำไปใช้ประโยชน์มากที่สุด คือ พลังงานแสงอาทิตย์จากรังสีแสงอาทิตย์ เนื่องจากพลังงานแสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ไม่ก่อให้เกิดมลพิษที่เป็นอันตราย นอกจากนี้ พลังงานแสงอาทิตย์ซึ่งอยู่ในรูปแสงตอนกลางวัน ถูกนำไปใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงตามธรรมชาติ และถูกสะท้อนกลับสู่ห้วงอวกาศ ส่วนที่เหลือจะถูกดูดซึมตามพื้นดิน ท้องทะเลและก้อนเมฆ ดังนั้นจึงเหมาะสมอย่างมากที่จะกักเก็บพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ต่าง ๆ เช่น ผลิตกำลังไฟฟ้า น้ำร้อน หรือใช้ในกระบวนการอบแห้ง เป็นต้น จึงได้มีการสำรวจและพัฒนาเทคโนโลยีเกี่ยวกับวิธีการกักเก็บพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ เพื่อที่จะได้กักเก็บพลังงานความร้อนให้ได้มากที่สุดและสามารถนำไปใช้ได้ อย่างมีประสิทธิภาพ

แม้ว่าการกักเก็บพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์จะสามารถทำได้อย่างอิสระก็ตาม แต่การที่จะกักเก็บพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์นั้นก็มียุทธศาสตร์ คือ รังสีแสงอาทิตย์จะมีเฉพาะช่วงเวลากลางวัน จึงต้องมีการกักเก็บพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ให้ได้มากที่สุดในช่วงนี้ และสามารถกักเก็บพลังงานความร้อนไว้ใช้ตลอดวันได้อีกด้วย ดังนั้นเครื่องกักเก็บพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์จึงมีส่วนประกอบที่ใช้ในการกักเก็บรังสีแสงอาทิตย์แล้วเปลี่ยนให้เป็นพลังงานความร้อน และถ่ายเทความร้อนนั้นไปยังสารทำงาน และถูกส่งไปเก็บไว้เพื่อใช้งานในลำดับถัดไป

และเพื่อที่จะให้สารที่นำไปใช้นั้นสามารถรักษาอุณหภูมิไว้ได้นานขึ้น จึงได้มีการศึกษาเกี่ยวกับระบบกักเก็บพลังงานความร้อน ซึ่งมีทั้งหมด 3 ระบบ ได้แก่ ระบบกักเก็บพลังงานความร้อนสัมผัส (Sensible Heat Storage) ระบบกักเก็บพลังงานความร้อนโดยใช้ปฏิกิริยาเคมีของสารชนิดต่าง ๆ (Thermochemical Heat Storage) และระบบกักเก็บพลังงานความร้อนแฝง (Latent Heat Storage) และระบบที่ได้รับความนิยมคือ ระบบกักเก็บพลังงานความร้อนแฝง โดยการใช้วัสดุเปลี่ยนสถานะ (Phase Change Material) เป็นวัสดุกักเก็บพลังงานความร้อน ซึ่งวัสดุเปลี่ยนสถานะนี้จะกักเก็บพลังงานความร้อนอยู่ในรูปของค่าพลังงานความร้อนแฝงระหว่างการเปลี่ยนสถานะ ซึ่งวัสดุเปลี่ยนสถานะแต่ละชนิด จะมีค่าพลังงานความร้อนแฝงที่แตกต่างกัน ตามคุณสมบัติเฉพาะตัวของวัสดุเปลี่ยนสถานะชนิดนั้น ๆ

งานวิจัยนี้จึงจะศึกษาความสามารถในการกักเก็บความร้อนของวัสดุเปลี่ยนสถานะ และเปรียบเทียบความสามารถในการกักเก็บความร้อนของวัสดุเปลี่ยนสถานะสองชนิด คือ พาราฟิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และไซคาร์บอนบา สำหรับใช้งานในเครื่องกักเก็บความร้อนจากแสงอาทิตย์ชนิดหลอดสุญญากาศ ภายใต้สภาพอากาศของประเทศไทย

## 1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญานิพนธ์

- 1.2.1 เพื่อศึกษาหลักการการทำงานและองค์ประกอบของเครื่องกักเก็บความร้อนจากแสงอาทิตย์ชนิดหลอดสุญญากาศ
- 1.2.2 เพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการกักเก็บความร้อนระหว่างพาราฟินและไซคาร์บอนบา ในการผลิตน้ำร้อนที่ 50 องศาเซลเซียส
- 1.2.3 เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกักเก็บความร้อนของเครื่องกักเก็บความร้อนจากแสงอาทิตย์ชนิดหลอดสุญญากาศระหว่างกรณีที่ใช้วัสดุเปลี่ยนสถานะกับไม่ใช้วัสดุเปลี่ยนสถานะเป็นวัสดุกักเก็บความร้อน

## 1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์

- 1.3.1 ศึกษาเครื่องกักเก็บความร้อนจากแสงอาทิตย์ชนิดหลอดสุญญากาศ
- 1.3.2 ศึกษาประสิทธิภาพในการกักเก็บความร้อนของวัสดุเปลี่ยนสถานะสองชนิด คือ พาราฟินและไซคาร์บอนบา ในการผลิตน้ำร้อนที่ 50 องศาเซลเซียส
- 1.3.3 ศึกษาประสิทธิภาพในการกักเก็บความร้อนของเครื่องกักเก็บความร้อนจากแสงอาทิตย์ชนิดหลอดสุญญากาศและปริมาณวัสดุเปลี่ยนสถานะที่ใช้เป็นวัสดุกักเก็บความร้อน ภายใต้สภาพอากาศของประเทศไทย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

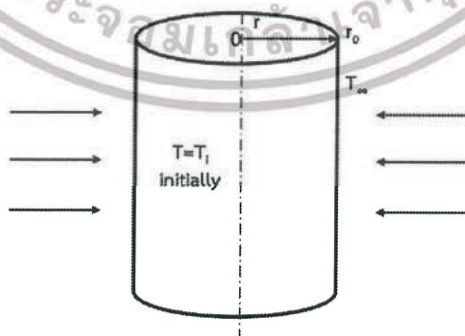
### ทฤษฎีเบื้องต้นและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 การถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer) [1]

การถ่ายเทความร้อน คือ การถ่ายเทพลังงานเนื่องมาจากความแตกต่างของอุณหภูมิ แบ่งออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ การนำความร้อน (Conduction) คือ การถ่ายเทพลังงานความร้อนจากอนุภาคของสารที่มีพลังงานความร้อนสูงกว่าไปยังอนุภาคที่มีพลังงานความร้อนต่ำกว่า (จากอุณหภูมิสูงไปยังอุณหภูมิต่ำ) การพาความร้อน (Convection) คือ การถ่ายเทพลังงานความร้อนผ่านตัวกลางที่เป็นของไหล (ของเหลวหรือแก๊ส) โดยที่ของไหลที่ได้รับความร้อนจะเคลื่อนที่พาความร้อนไปด้วย และการแผ่รังสีความร้อน (Radiation) คือ พลังงานความร้อนที่แผ่ออกจากสารหนึ่ง ณ อุณหภูมิหนึ่ง ๆ ซึ่งสารนั้นอาจจะเป็นของแข็ง ของเหลว หรือแก๊สก็ได้ โดยพลังงานความร้อนของการแผ่รังสีนั้นจะถูกส่งออกมาในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ในขณะที่การนำและการพาความร้อนจำเป็นต้องมีตัวกลาง แต่การแผ่รังสีความร้อนนั้นไม่จำเป็นต้องมีกลาง และการแผ่รังสีความร้อนจะมีประสิทธิภาพมากที่สุดในสภาวะสุญญากาศ ซึ่งการถ่ายเทความร้อนมีหน่วยเป็นวัตต์ต่อตารางเมตร ( $W/m^2$ )

##### 2.1.1 การนำความร้อนแบบไม่คงตัวในทรงกระบอกแบบหนึ่งมิติ [23]

พิจารณาอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาและตำแหน่งแบบหนึ่งมิติ และพิจารณาทรงกระบอกที่มีรัศมีเท่ากับ  $r_0$  ซึ่งตอนเริ่มต้น ทรงกระบอกมีอุณหภูมิเท่ากับ  $T_i$  และ ณ เวลา  $t = 0$  รอบ ๆ ทรงกระบอกมีอุณหภูมิกว้างที่เท่ากับ  $T_\infty$  และอุณหภูมิจะคงที่ตลอด เมื่อ  $t > 0$  การถ่ายเทความร้อนระหว่างวัตถุและสิ่งแวดล้อมมีสมมาตรในการถ่ายเทความร้อน สำหรับทรงกระบอก คือ จุดกึ่งกลางของทรงกระบอก ( $r = 0$ ) ดังรูปที่ 2.1 นอกจากนั้น กรณีนี้จะไม่มีการพิจารณาการถ่ายเทความร้อนแบบแผ่รังสีระหว่างวัตถุและสิ่งแวดล้อมและจะพิจารณาตัวแปรต่าง ๆ ในเทอมไร้หน่วยดังนี้



รูปที่ 2.1 การถ่ายเทความร้อนในทรงกระบอกแบบหนึ่งมิติ

อุณหภูมิ: 
$$\theta(r, t) = \frac{T(r, t) - T_\infty}{T_i - T_\infty} \quad (2.1)$$

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน: 
$$Bi = \frac{hr_0}{k} \quad (2.2)$$

เวลา: 
$$\tau = \frac{\alpha t}{r_0^2} \quad (2.3)$$

และในการหาอุณหภูมิ ณ เวลาใด ๆ สามารถคำนวณได้ดังสมการ

$$\theta(r, t) = \frac{T(r, t) - T_\infty}{T_i - T_\infty} = A_1 e^{-\lambda_1^2 \tau} J_0\left(\lambda_1 \frac{r}{r_0}\right) \quad (2.4)$$

$T(r, t)$  = อุณหภูมิ ที่  $r$  ณ เวลา  $t$  ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_\infty$  = อุณหภูมิคงที่รอบ ๆ วัตถุ ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_i$  = อุณหภูมิเริ่มต้น ณ  $t = 0$  ( $^{\circ}\text{C}$ )

$A_1$  = ค่าคงที่

$\lambda_1$  = ค่าคงที่

$\tau$  = เวลาในเทอมไร้หน่วย

$J_0$  = อันดับที่ 0 ของฟังก์ชัน Bessel

$r$  = ตำแหน่งที่พิจารณา (m)

$r_0$  = รัศมีของทรงกระบอก (m)

เมื่อค่าคงที่  $A_1$  และ  $\lambda_1$  เป็นฟังก์ชันของ  $Bi$  เท่านั้น และค่าคงที่เหล่านี้สามารถดูได้จากในตารางที่ 2.1 และกรณีพิจารณา ณ จุดกึ่งกลางของทรงกระบอก ( $r = 0$ ) จะทำให้  $J_0(0) = 1$  ทำให้ได้สมการดังนี้

ณ จุดกึ่งกลางของทรงกระบอก ( $r = 0$ )

$$\theta(r, t) = \frac{T(r, t) - T_\infty}{T_i - T_\infty} = A_1 e^{-\lambda_1^2 \tau} \quad (2.5)$$

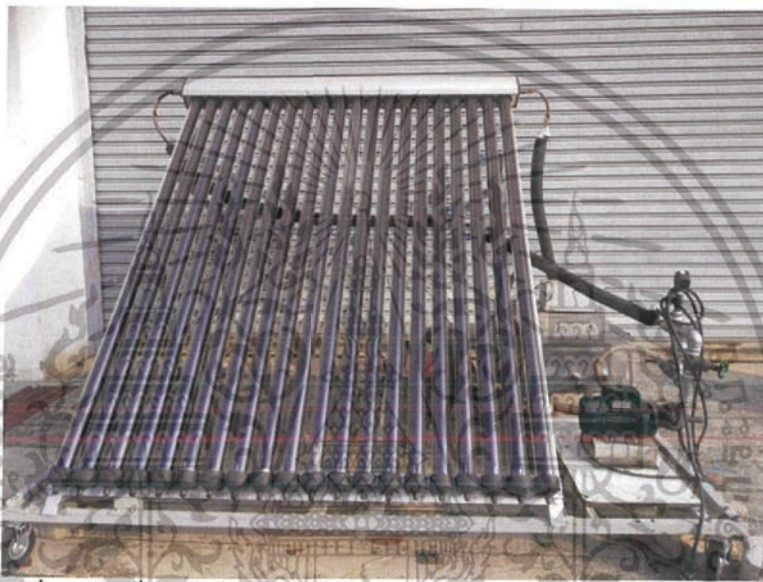
ตารางที่ 2.1 ค่า  $A_1$  และ  $\lambda_1$  ของรูปทรงต่าง ๆ

Bi	Plane Wall		Cylinder		Sphere	
	$\lambda_1$	$A_1$	$\lambda_1$	$A_1$	$\lambda_1$	$A_1$
0.01	0.0998	1.0017	0.1412	1.0025	0.1730	1.0030
0.02	0.1410	1.0033	0.1995	1.0050	0.2445	1.0060
0.04	0.1987	1.0066	0.2814	1.0099	0.3450	1.0120
0.06	0.2425	1.0098	0.3438	1.0148	0.4217	1.0179
0.08	0.2791	1.0130	0.3960	1.0197	0.4860	1.0239
0.1	0.3111	1.0161	0.4417	1.0246	0.5423	1.0298
0.2	0.4328	1.0311	0.6170	1.0483	0.7593	1.0592
0.3	0.5218	1.0450	0.7465	1.0712	0.9208	1.0880
0.4	0.5932	1.0580	0.8516	1.0931	1.0528	1.1164
0.5	0.6533	1.0701	0.9408	1.1143	1.1656	1.1441
0.6	0.7051	1.0814	1.0184	1.1345	1.2644	1.1713
0.7	0.7506	1.0918	1.0873	1.1539	1.3525	1.1978
0.8	0.7910	1.1016	1.1490	1.1724	1.4320	1.2236
0.9	0.8274	1.1107	1.2048	1.1902	1.5044	1.2488
1.0	0.8603	1.1191	1.2558	1.2071	1.5708	1.2732
2.0	1.0769	1.1785	1.5995	1.3384	2.0288	1.4793
3.0	1.1925	1.2102	1.7887	1.4191	2.2889	1.6227
4.0	1.2646	1.2287	1.9081	1.4698	2.4556	1.7202
5.0	1.3138	1.2403	1.9898	1.5029	2.5704	1.7870
6.0	1.3496	1.2479	2.0490	1.5253	2.6537	1.8338
7.0	1.3766	1.2532	2.0937	1.5411	2.7165	1.8673
8.0	1.3978	1.2570	2.1286	1.5526	2.7654	1.8920
9.0	1.4149	1.2598	2.1566	1.5611	2.8044	1.9106
10.0	1.4289	1.2620	2.1795	1.5677	2.8363	1.9249
20.0	1.4961	1.2699	2.2880	1.5919	2.9857	1.9781
30.0	1.5202	1.2717	2.3261	1.5973	3.0372	1.9898
40.0	1.5325	1.2723	2.3455	1.5993	3.0632	1.9942
50.0	1.5400	1.2727	2.3572	1.6002	3.0788	1.9962
100.0	1.5552	1.2731	2.3809	1.6015	3.1102	1.9990
$\infty$	1.5708	1.2732	2.4048	1.6021	3.1416	2.0000

## 2.2 เครื่องกักเก็บความร้อนจากแสงอาทิตย์ชนิดหลอดสุญญากาศ

ในการกักเก็บพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ให้มีประสิทธิภาพก็มีอุปสรรค แม้ว่าในการกักเก็บพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์นั้น จะทำได้อย่างอิสระก็ตาม นั่นคือรังสีจากแสงอาทิตย์จะมีเฉพาะช่วงเวลากลางวัน จึงต้องมีการกักเก็บพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ให้ได้มากที่สุด ในช่วงนี้ และต้องกักเก็บพลังงานความร้อนนี้ไว้ใช้ตลอดวันอีกด้วย เครื่องกักเก็บพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ จะมีส่วนประกอบที่ทำหน้าที่ดูดซับรังสีจากแสงอาทิตย์แล้วเปลี่ยนให้เป็นพลังงานความร้อน และถ่ายเทความร้อนนั้นไปยังของไหลทำงาน (Working Fluid) ที่ทำหน้าที่เป็นตัวแลกเปลี่ยนความร้อน ดังนั้น เครื่องกักเก็บพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์จึงเป็น

องค์ประกอบหลักที่สำคัญในการกักเก็บพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ [2] ซึ่งเครื่องกักเก็บความร้อนจากแสงอาทิตย์ชนิดหลอดสุญญากาศมีองค์ประกอบที่สำคัญ คือ หลอดสุญญากาศ ซึ่งหลอดสุญญากาศประกอบด้วย หลอดแก้วชั้นนอกชนิดโดร์เนีย (Dornier Type หรือ Heat Pipe Evacuated Tube) ซึ่งเป็นหลอดแก้วซ้อนกันสองชั้นที่ภายในช่องว่างระหว่างหลอดแก้วเป็นสุญญากาศ เพื่อลดการสูญเสียพลังงานจากการนำและการพาความร้อน และท่อชั้นในทำจากโลหะทองแดงหรืออลูมิเนียม โดยมีตัวกลาง (medium) เป็นของเหลว เช่น Propylene Glycol ไทลเวียนอยู่ภายในท่อชั้นใน เครื่องกักเก็บความร้อนจากแสงอาทิตย์ด้วยแผงรับความร้อนแบบหลอดสุญญากาศและหลอดสุญญากาศแสดงดังรูปที่ 2.2 และ 2.3



รูปที่ 2.2 เครื่องกักเก็บความร้อนจากแสงอาทิตย์ชนิดหลอดสุญญากาศ

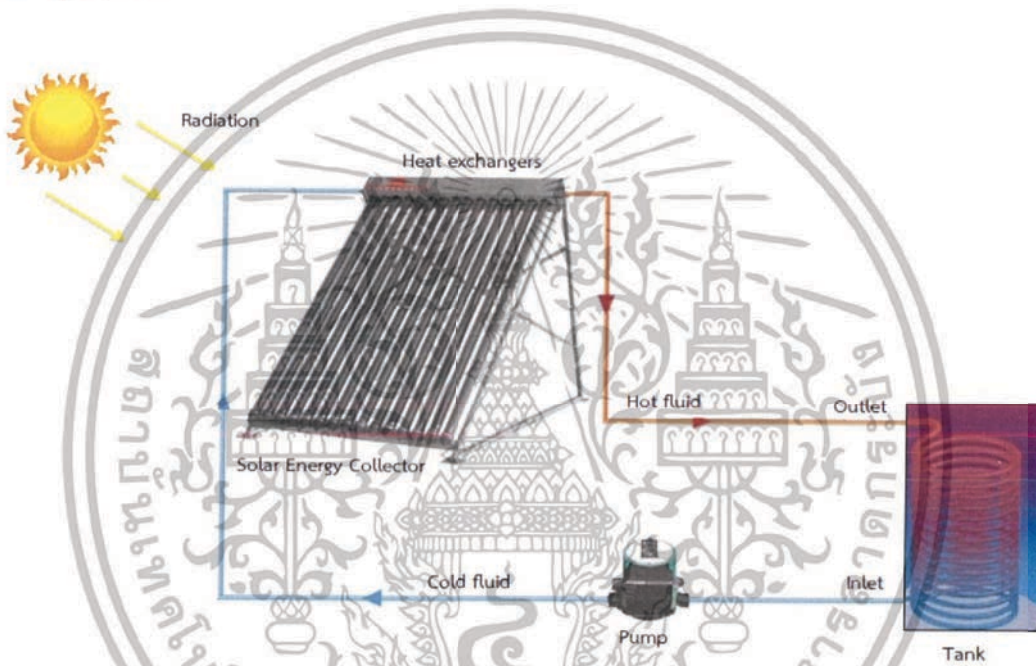


รูปที่ 2.3 หลอดสุญญากาศ

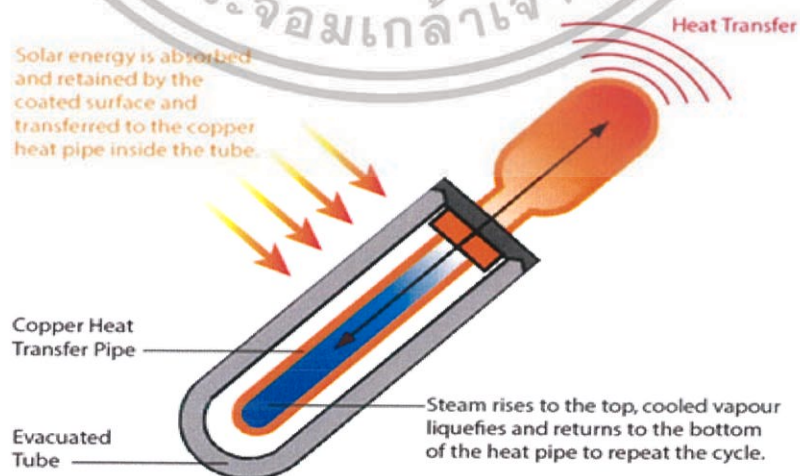
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.1 หลักการทำงานของเครื่องกักเก็บความร้อนจากแสงอาทิตย์ชนิดหลอดสุญญากาศ

เมื่อมีการแผ่รังสีความร้อนจากดวงอาทิตย์ พลังงานความร้อนที่ได้จากการแผ่รังสีจะถูกดูดซับผ่านสารพิเศษที่มีคุณสมบัติเลือกรังสีซึ่งเคลือบอยู่บนหลอดแก้วใสชั้นนอกของท่อ หลังจากนั้นพลังงานความร้อนที่ได้จากการดูดซับจะถูกถ่ายเทไปยังสารทำงานภายในท่อ สารทำงานเมื่อได้รับความร้อนแล้วจะเกิดการเปลี่ยนสถานะและระเหยไปยังปลายท่อด้านบน เพื่อทำการแลกเปลี่ยนความร้อนกับของเหลวที่ถูกปั๊มออกจากถังมายังปลายท่อด้านบน ของเหลวเมื่อผ่านการแลกเปลี่ยนความร้อนแล้วจะมีอุณหภูมิสูงขึ้น และถูกส่งไปเก็บไว้เพื่อใช้งานในลำดับถัดไป รูปที่ 2.3 แสดงการทำงานของเครื่องกักเก็บความร้อนจากแสงอาทิตย์ชนิดหลอดสุญญากาศ และรูปที่ 2.4 แสดงส่วนประกอบของหลอดสุญญากาศ



รูปที่ 2.4 หลักการทำงานของเครื่องกักเก็บความร้อนจากแสงอาทิตย์ชนิดหลอดสุญญากาศ



รูปที่ 2.5 หลักการทำงานของท่อเก็บพลังงานแสงอาทิตย์แบบสุญญากาศ [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2.2 ประเภทของเครื่องกักเก็บความร้อน

เครื่องกักเก็บพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ แบ่งออกเป็นสองประเภทหลัก ๆ คือ ชนิดหยุดนิ่ง (Stationary) และชนิดหมุนตามแสงอาทิตย์ (Tracking) ดังที่แสดงในรูปที่ 2.5 [4] องค์ประกอบที่ต่างกันของแต่ละเครื่อง จะช่วยให้ได้ช่วงอุณหภูมิที่กว้างขึ้น ตัวอย่างเช่น เครื่องกักเก็บพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ (FPC) สามารถดำเนินการได้ในช่วงอุณหภูมิ 20-80 °C [5] และเครื่องกักเก็บพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ชนิดหลอดสุญญากาศสามารถดำเนินการได้ในช่วงอุณหภูมิ 50-200 °C [6] เครื่องกักเก็บความร้อนจากแสงอาทิตย์ชนิดแผ่นเรียบ (FPC) เป็นที่นิยม เนื่องจากมีต้นทุนการบำรุงรักษาต่ำและการออกแบบที่เรียบง่าย แต่อย่างไรก็ตาม เครื่องกักเก็บพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ชนิดแผ่นเรียบ มีข้อบกพร่องอยู่สองประการ คือ มีการสูญเสียพลังงานความร้อนจากการพาความร้อนผ่านฝาครอบแก้วจากแผ่นตัวกักเก็บความร้อน และไม่มีการหมุนตามดวงอาทิตย์ และในทางตรงกันข้าม เครื่องกักเก็บพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ชนิดหลอดสุญญากาศสามารถแก้ไขข้อบกพร่องทั้งสองได้ เนื่องจากการมีสุญญากาศในช่องว่างรูปวงแหวนระหว่างท่อแก้วทั้งสองหลอด การออกแบบท่อแบบนี้จึงไม่จำเป็นต้องออกแบบเครื่องให้หมุนตามดวงอาทิตย์



รูปที่ 2.6 แผนผังการแบ่งประเภทของเครื่องกักเก็บความร้อนจากแสงอาทิตย์ [4]

## 2.2.3 การคำนวณประสิทธิภาพของเครื่องกักเก็บความร้อนจากแสงอาทิตย์ชนิดหลอดสุญญากาศ

ประสิทธิภาพของเครื่องกักเก็บความร้อนจากแสงอาทิตย์ชนิดหลอดสุญญากาศ จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิสูงสุดของสารที่อยู่ในถังกักเก็บสาร ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\eta_s = \frac{\dot{m}c_p(T_{max}-T_i)}{A_c G_{avg}} \quad (2.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

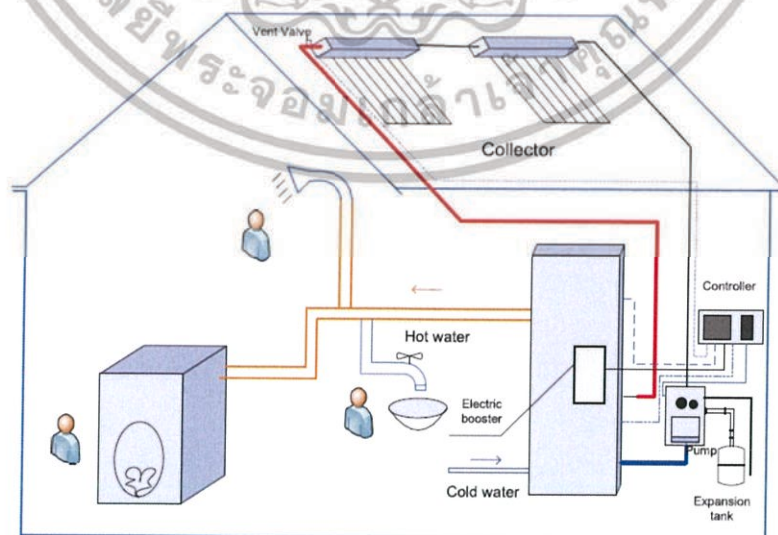
- $\eta_s$  = ประสิทธิภาพของเครื่องกักเก็บความร้อนจากแสงอาทิตย์ชนิดหลอดสุญญากาศ (%)
- $\dot{m}$  = อัตราการไหลของสารในถังกักเก็บสาร (kg/s)
- $c_p$  = ความจุความร้อนจำเพาะของสารในถังกักเก็บสาร (J/(kg K))
- $T_{max}$  = อุณหภูมิสูงสุดของสารในถังกักเก็บสาร (°C)
- $T_i$  = อุณหภูมิเริ่มต้นของสารในถังกักเก็บสาร (°C)
- $A_c$  = พื้นที่ในการกักเก็บความร้อนจากแสงอาทิตย์ (m<sup>2</sup>)
- $G_{avg}$  = ความเข้มแสงเฉลี่ย (W/m<sup>2</sup>)

#### 2.2.4 ประโยชน์ของเครื่องกักเก็บความร้อนจากแสงอาทิตย์ชนิดหลอดสุญญากาศ [7]

เครื่องกักเก็บพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ชนิดหลอดสุญญากาศกำลังเป็นที่นิยมในปัจจุบัน สำหรับเอกลักษณ์ของเครื่องที่สามารถกักเก็บความร้อนจากแสงอาทิตย์ได้ตลอดทั้งวัน เนื่องจากรูปร่างของท่อ นักวิจัยหลายคนได้ทำงานวิจัยเกี่ยวกับเครื่องกักเก็บความร้อนจากแสงอาทิตย์ชนิดหลอดสุญญากาศ ซึ่งสามารถใช้ในการทำความร้อนหรือระบายความร้อนได้ ความต้องการในอุตสาหกรรม เช่น สิ่งทอ กระดาษ หนังก สระว่ายน้ำ ที่อยู่อาศัย หม้อไอน้ำบ้าน และโรงพยาบาล โรงแรม ประโยชน์ของเครื่องกักเก็บความร้อนจากแสงอาทิตย์ชนิดหลอดสุญญากาศ สามารถแบ่งออกได้สองส่วน คือ ส่วนครัวเรือนและส่วนอุตสาหกรรม

##### 2.2.4.1 ประโยชน์สำหรับครัวเรือน

เครื่องกักเก็บพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ชนิดหลอดสุญญากาศเป็นเทคโนโลยีที่ครบถ้วนสำหรับการใช้งานในครัวเรือน เช่น สามารถทำงานได้ในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่กลางถึงสูงตามความต้องการ และรูปที่ 2.6 แสดงให้เห็นถึงประโยชน์ของเครื่องกักเก็บความร้อนจากแสงอาทิตย์ชนิดหลอดสุญญากาศ สำหรับครัวเรือน



รูปที่ 2.7 ประโยชน์ของเครื่องกักเก็บความร้อนจากแสงอาทิตย์ชนิดหลอดสุญญากาศ สำหรับครัวเรือน [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.4.1.1 เครื่องทำน้ำอุ่นพลังงานแสงอาทิตย์

ตั้งแต่ทศวรรษที่ผ่านมา ตลาดโลกมีเครื่องทำน้ำอุ่นพลังงานแสงอาทิตย์ที่เติบโตขึ้นอย่างรวดเร็วส่งผลให้มีการพัฒนาผลิตภัณฑ์ให้มีคุณภาพดีขึ้นด้วยเทคโนโลยี ๆ เครื่องทำน้ำอุ่นพลังงานแสงอาทิตย์เป็นอุปกรณ์สำหรับให้ความร้อนแก่น้ำ โดยการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในการผลิตไอน้ำ สำหรับความต้องการในครัวเรือนและอุตสาหกรรม พลังงานแสงอาทิตย์มาจากดวงอาทิตย์ในปริมาณที่ไม่มีที่สิ้นสุด เช่น รูปแบบของรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกลงบนผิวดูดซึม จากนั้นจะเปลี่ยนเป็นความร้อนที่ใช้สำหรับการให้ความร้อนแก่น้ำเมื่อนำเครื่องกักเก็บพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ชนิดหลอดสุญญากาศมาใช้เพื่อให้ความร้อนน้ำ จะเรียกว่า เครื่องทำน้ำอุ่นพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดหลอดสุญญากาศ ซึ่งเครื่องทำน้ำอุ่นพลังงานแสงอาทิตย์มีหลายประเภท เช่น เครื่องทำน้ำอุ่นพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดแผ่นเรียบ เครื่องทำน้ำอุ่นพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดเข้มข้น และเครื่องทำน้ำอุ่นพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดหลอดสุญญากาศ โดยเครื่องทำน้ำอุ่นพลังงานแสงอาทิตย์เข้มข้นใช้สำหรับน้ำที่มีอุณหภูมิสูงมากหรือไอน้ำ และเครื่องทำน้ำอุ่นพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดแผ่นเรียบถูกแทนที่ด้วยเครื่องทำน้ำอุ่นพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดหลอดสุญญากาศ เนื่องจากประโยชน์มากมายของเครื่องทำน้ำอุ่นพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดหลอดสุญญากาศ เครื่องกักเก็บพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ชนิดหลอดสุญญากาศเป็นจุดสนใจของตลาดในการพัฒนาเครื่องทำน้ำอุ่นพลังงานแสงอาทิตย์แบบทันสมัยเนื่องจากมีต้นทุนในการผลิตต่ำ

### 2.2.4.1.2 เครื่องปรับอากาศ

ปัจจุบันนักวิจัยกำลังศึกษาเทคโนโลยีที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม สำหรับเครื่องปรับอากาศ เนื่องจากการผลิตพลังงานไฟฟ้า ทำให้เกิดมลพิษ และ Mehta and Rane [8] ได้ศึกษาระบบปรับอากาศแบบดูดความชื้นที่สามารถนำไปใช้กับพลังงานแสงอาทิตย์ได้ ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานทดแทนที่ปราศจากมลพิษ รังสีจากดวงอาทิตย์สามารถใช้งานได้อย่างมากในช่วงฤดูร้อน เมื่อความต้องการใช้เครื่องปรับอากาศสูงขึ้นแล้วทำให้การใช้พลังงานจากแหล่งพลังงานแสงอาทิตย์มากขึ้นด้วย

### 2.2.4.1.3 สระว่ายน้ำ

Sakhrieh และคณะ [9] ได้ทำการทดลองเกี่ยวกับเครื่องกักเก็บพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ 5 ประเภท ได้แก่ เครื่องกักเก็บพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ชนิดท่อทองแดงเคลือบสีดำ (Type I) เครื่องกักเก็บพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ชนิดท่อทองแดงเคลือบสีน้ำเงิน (Type II) เครื่องกักเก็บพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ชนิดท่อทองแดง (Type III) เครื่องกักเก็บพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ชนิดท่ออลูมิเนียม (Type IV) และเครื่องกักเก็บพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ชนิดหลอดสุญญากาศ (Type V) เพื่อให้ความร้อนแก่สระว่ายน้ำ เป้าหมายของการทดลอง คือ การเปลี่ยนระบบทำความร้อนของสระว่ายน้ำที่ Hashemite University of Jordan โดยใช้ระบบทำความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพและคุ้มค่ามากขึ้น จากการทดลองพบว่า เครื่องกักเก็บพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ชนิดหลอดสุญญากาศ มีประสิทธิภาพสูงที่สุด อย่างไรก็ตาม การใช้ระยะเวลาในการคืนทุนต่ำสุดเท่ากับ 1.5 ปี พบว่าเป็นเครื่องกักเก็บพลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความร้อนจากแสงอาทิตย์ชนิดท่อลูมิเนียมและเครื่องกักเก็บพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ชนิดหลอดสุญญากาศ และการใช้ระยะเวลาในการคืนทุน 1.9 ปี แม้ว่าเครื่องกักเก็บพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ชนิดท่อลูมิเนียม จะมีระยะเวลาในการคืนทุนต่ำสุด แต่ก็ไม่ควรใช้ในโรงงานขนาดใหญ่ เช่น เครื่องทำความร้อนน้ำในสระว่ายน้ำ

#### 2.2.4.1.4 หม้อหุงข้าวพลังงานแสงอาทิตย์

Sharma และคณะ [10] ได้ศึกษาประสิทธิภาพของหม้อหุงข้าวพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้เครื่องกักเก็บความร้อนจากแสงอาทิตย์ชนิดหลอดสุญญากาศกับหน่วยจัดเก็บวัสดุเปลี่ยนสถานะ (PCM) โดยการออกแบบถูกแยกเป็นสองส่วนต่างกัน ส่วนหนึ่งใช้ในการกักเก็บพลังงานและอีกส่วนหนึ่งใช้ในการประกอบอาหาร ในช่วงเวลากลางวัน วัสดุเปลี่ยนสถานะจะกักเก็บความร้อนเพื่อนำไปใช้ในการประกอบอาหารในช่วงเวลากลางคืน พบว่าการประกอบอาหารในช่วงเวลากลางวันและช่วงเวลากลางคืนนั้นไม่ได้มีผลต่างกันมาก เนื่องจากวัสดุเปลี่ยนสถานะสามารถถ่ายเทความร้อนเพื่อนำมาใช้ในการประกอบอาหารได้เร็ว แม้ว่าเครื่องกักเก็บความร้อนจากแสงอาทิตย์ชนิดหลอดสุญญากาศจะมีราคาแพง แต่ก็สามารถให้อุณหภูมิได้ถึง  $130^{\circ}\text{C}$  จึงมีการนำไปประยุกต์ใช้กับการประกอบอาหารทั้งในช่วงเวลากลางคืนและช่วงเวลาที่ไม่มีแสงแดด

#### 2.2.4.2 ประโยชน์ในอุตสาหกรรม

สำหรับการใช้งานในอุตสาหกรรม ต้องใช้อุณหภูมิที่สูงขึ้น เมื่อเทียบกับการใช้งานในครัวเรือน เครื่องกักเก็บความร้อนจากแสงอาทิตย์ชนิดหลอดสุญญากาศสามารถผลิตความร้อนที่อุณหภูมิสูงถึง  $200^{\circ}\text{C}$  [11] ดังนั้นเครื่องกักเก็บพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ชนิดหลอดสุญญากาศจึงสามารถใช้งานในอุตสาหกรรมได้

##### 2.2.4.2.1 เครื่องยนต์ความร้อน

Madduri และคณะ [12] ได้ศึกษาเกี่ยวกับระบบของเครื่องทำน้ำอุ่นชนิดหลอดสุญญากาศและได้ใช้เป็นเครื่องจักรทางความร้อน ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ความร้อน การใช้ระบบหลอดสุญญากาศเป็นแหล่งจ่ายพลังงานความร้อนที่อุณหภูมิ  $180\text{-}220^{\circ}\text{C}$  สามารถสรุปได้ว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น จะทำให้หลอดสุญญากาศมีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนรังสีจากแสงอาทิตย์ไปเป็นความร้อนได้มากขึ้นและทำให้กำลังส่งออกทางกลต่อหน่วยพื้นที่ที่ติดตั้งเครื่องกักเก็บพลังงานความร้อนเพิ่มขึ้นด้วย

##### 2.2.4.2.2 การอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์

เทคนิคที่ใช้กันมากที่สุดในการรักษาผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร คือ การอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ แต่ขั้นตอนนี้มีข้อบกพร่องและจุดอ่อน เนื่องจากผลิตภัณฑ์อาจถูกทำลาย โดยฝุ่นละออง ฝน ลม และความชื้นหรือผลิตภัณฑ์ที่เสียหาย เนื่องจากสัตว์ การย่อยสลายอาจทำให้พืชที่เสื่อมสภาพ เชื้อรา และแมลงสามารถทำลายผลผลิตเหล่านี้ได้ นอกจากนี้ การอบแห้งด้วยแสงแดดจำเป็นต้องใช้พื้นที่ขนาดใหญ่ในการเพาะปลูกพืชที่เก็บเกี่ยว ซึ่งต้องใช้เวลาและมีความต้องการแรงงาน ดังนั้นการผลิตทางการเกษตร เช่น ผักและผลไม้ที่ไม่มีค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน ในสภาพสุขอนามัยที่สะอาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และมาตรฐาน เทคโนโลยีการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์เป็นอีกทางเลือกหนึ่ง สำหรับอุตสาหกรรมแปรรูปอาหารขนาดเล็กหรือเพื่อการเกษตร เทคโนโลยีเครื่องอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์มีความสะดวกสบาย เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและเชื่อถือได้ในการผลิตผลผลิตอาหารที่ ถูกสุขลักษณะและมีคุณภาพดี เนื่องจากเทคโนโลยีนี้ต้องการพื้นที่น้อย ประหยัดค่าใช้จ่าย ด้านพลังงาน ยังช่วยเพิ่มคุณภาพของผลผลิต [13]

#### 2.2.4.2.3 การผลิตไอน้ำ

เครื่องกักเก็บพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ชนิดหลอดสุญญากาศสามารถใช้ได้ในงาน ที่ต้องการอุณหภูมิสูง เช่น การทำอาหารด้วยไอน้ำ หม้อไอน้ำซักรีด ฯลฯ เนื่องจากเครื่องกักเก็บ พลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ชนิดหลอดสุญญากาศ เป็นที่รู้จักกันว่าเป็นเทคโนโลยีที่เป็น ทางเลือกที่ดีที่สุดในการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงถึง 200 °C [14] Vandan และคณะ [15] ได้ศึกษา เกี่ยวกับการออกแบบเครื่องกักเก็บพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ชนิดหลอดสุญญากาศ สำหรับ ใช้ในการผลิตไอน้ำที่มีอุณหภูมิสูง สำหรับใช้ในการประกอบอาหาร เตารีดไอน้ำ ฯลฯ พบว่าเครื่อง กักเก็บความร้อนจากแสงอาทิตย์ชนิดหลอดสุญญากาศสามารถให้อุณหภูมิได้ถึง 200 °C ซึ่งสูงกว่า เครื่องกักเก็บความร้อนจากแสงอาทิตย์ชนิดแผ่นเรียบที่ให้อุณหภูมิได้เพียง 70 °C

### 2.3 วัสดุเปลี่ยนสถานะ

วัสดุเปลี่ยนสถานะเป็นวัสดุกักเก็บความร้อนชนิดหนึ่งซึ่งนิยมนำไปใช้สำหรับกักเก็บพลังงาน ความร้อน ซึ่งจะกักเก็บพลังงานความร้อนอยู่ในรูปของค่าพลังงานความร้อนแฝงระหว่างการเปลี่ยน สถานะ โดยวัสดุเปลี่ยนสถานะแต่ละชนิดจะมีค่าพลังงานความร้อนแฝงที่ต่างกันไปตามคุณสมบัติ เฉพาะตัวของวัสดุเปลี่ยนสถานะชนิดนั้น ๆ ดังนั้นในการเลือกวัสดุเปลี่ยนสถานะที่เหมาะสมสำหรับ การใช้งาน จึงขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุเปลี่ยนสถานะเองและเงื่อนไขสำหรับการนำไปใช้งาน ซึ่งวัสดุเปลี่ยนสถานะที่ดีควรมีคุณสมบัติดังนี้

1. มีค่าการนำความร้อนที่สูง
2. มีค่าพลังงานความร้อนแฝงที่สูง
3. มีความเสถียรในการกักเก็บความร้อนสำหรับการใช้งาน
4. มีความเป็นอันตรายต่อสุขภาพน้อย
5. มีต้นทุนหรือราคาต่ำ

และความสามารถในการกักเก็บความร้อนของวัสดุเปลี่ยนสถานะ สามารถคำนวณได้ดังสมการต่อไปนี้ [16]

$$Q = \int_{T_i}^{T_m} mc_p dT + ma_m \Delta h_m + \int_{T_m}^{T_f} mc_p dT \quad (2.7)$$

$$Q = m[c_{sp}(T_m - T_i) + a_m \Delta h_m + c_{lp}(T_f - T_m)] \quad (2.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$Q$	= ปริมาณความร้อนที่ถูกกักเก็บไว้ (J)
$m$	= มวลของสารที่เป็นวัสดุกักเก็บความร้อน (kg)
$a_m$	= สัดส่วนที่มีการหลอมเหลว
$\Delta h_m$	= ความร้อนแฝงของการหลอมเหลว (J/kg)
$c_p$	= ความจุความร้อนจำเพาะ (J/(kg K))
$c_{sp}$	= ความจุความร้อนจำเพาะระหว่าง $T_i$ และ $T_m$ (J/(kg K))
$c_{lp}$	= ความจุความร้อนจำเพาะระหว่าง $T_m$ และ $T_f$ (J/(kg K))
$T_i$	= อุณหภูมิเริ่มต้น ( $^{\circ}\text{C}$ )
$T_m$	= อุณหภูมิการหลอมเหลว ( $^{\circ}\text{C}$ )
$T_f$	= อุณหภูมิสุดท้าย ( $^{\circ}\text{C}$ )

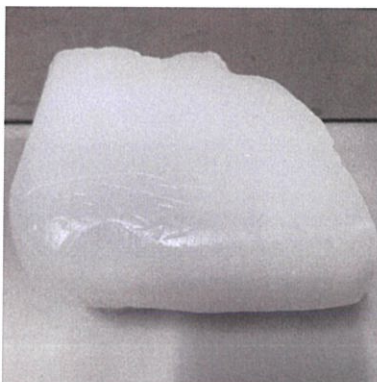
### 2.3.1 ประเภทของวัสดุเปลี่ยนสถานะ

วัสดุเปลี่ยนสถานะ สามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภทดังนี้

1. สารประกอบอินทรีย์ (Organic Compound) เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ได้จากกระบวนการกลั่นแยกน้ำมันดิบ มีทั้งสถานะของแข็ง ของเหลว และแก๊ส เช่น พาราฟิน
2. สารประกอบอนินทรีย์ (Inorganic Compound) เช่น โลหะ เกลือไฮเดรต ซึ่งสารประเภทนี้ไม่ค่อยได้รับความนิยมในการนำมาใช้เป็นสารกักเก็บความร้อน เนื่องจากปัญหาเรื่องน้ำหนักและมีความว่องไวต่อการทำปฏิกิริยา [16]
3. สารยูเทกติก (Eutectic Compound) เป็นสารผสมระหว่างสารประกอบอินทรีย์และสารประกอบอนินทรีย์ตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป เพื่อให้ได้สารที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ ซึ่งจุดหลอมเหลวของสารเหล่านี้จะต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของสารที่นำมาผสมกัน [17]

### 2.4 พาราฟิน (Paraffin Wax) [18]

พาราฟินเป็นวัสดุเปลี่ยนสถานะที่ได้รับความนิยม เนื่องจากพาราฟินสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้อย่างหลากหลาย เช่น ใช้ทำเป็นเชื้อเพลิง ใช้ทำเทียนไข และพาราฟินยังถูกนำมาใช้เป็นสารกักเก็บความร้อน เนื่องจากมีค่าความร้อนแฝงของการหลอมเหลวสูง ไม่มีการกัดกร่อนและมีความเสถียรทางเคมี รูปและคุณสมบัติของพาราฟินแสดงดังรูปที่ 2.7 และตารางที่ 2.1 ตามลำดับ



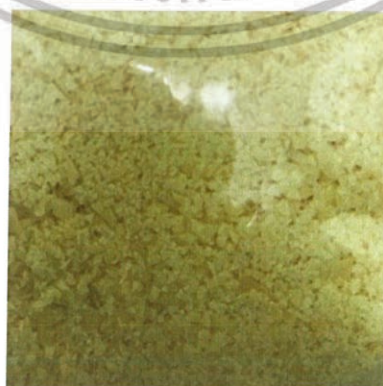
รูปที่ 2.8 พาราฟิน

## ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของพาราฟิน

ชนิดของสารประกอบ	C45
ความถ่วงจำเพาะ	0.900
จุดหลอมเหลว (°C)	58
จุดวาบไฟ (°C)	199
สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (W/(m K))	0.24
ความจุความร้อนจำเพาะ (kJ/(kg K))	2.9
ความร้อนแฝงการหลอมเหลว (kJ/kg)	189

## 2.5 ไชคาร์นอบา (Carnauba Wax)

ไชคาร์นอบา เป็นไขที่ได้จากใบของปาล์มคาร์นอบา (*Copernicia prunifera*) ซึ่งขึ้นเฉพาะทางทิศตะวันออกเฉียงเหนือของบราซิล มีลักษณะเป็นเกล็ดสีเหลืองน้ำตาล คาร์นอบาเป็นไขจากธรรมชาติที่แข็งที่สุด ประกอบด้วยกรดไขมันกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ ไม่ละลายในน้ำและเอทานอล นอกจากนี้ไชคาร์นอบายังมีคุณสมบัติเป็นสารเคลือบเงา ใช้ในงานเคลือบสีรถยนต์ ผสมในน้ำยาขัดรองเท้าและในอุตสาหกรรมอาหาร รวมทั้งยังรักษาความชุ่มชื้นและไม่ก่อให้เกิดอาการแพ้ได้ง่าย จึงใช้ผสมในเครื่องสำอางค์ [19]



รูปที่ 2.9 ไชคาร์นอบา

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติของไซคาร์บอนา [20]

ความถ่วงจำเพาะ	0.998
จุดหลอมเหลว (°C)	84
จุดวาบไฟ (°C)	282.22
สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (W/(m K)) [21]	0.15
ความจุความร้อนจำเพาะ (kJ/(kg K)) [22]	1.458
ความร้อนแฝงการหลอมเหลว (kJ/kg)	173.4



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### การดำเนินงาน

#### 3.1 การสังเกตลักษณะการหลอมเหลวและการถ่ายเทความร้อนของวัสดุเปลี่ยนสถานะ วัสดุและอุปกรณ์

1. บีกเกอร์ขนาด 400 มิลลิลิตร
2. เครื่องชั่งน้ำหนัก 2 ตำแหน่ง
3. ซ้อนตักสาร
4. เครื่องกวนสารชนิดแม่เหล็กพร้อมให้ความร้อน (Hotplate and Stirrer)
5. แท่งแม่เหล็กกวนสาร (Magnetic bar)
6. หม้อต้ม
7. ขาดังและแคมป์จับ
8. เทอร์โมคัปเปิล
9. แท่งแก้ว

#### สารเคมี

1. พาราฟิน (Paraffin Wax)
2. ไชคาร์นوبا (Carnauba Wax)
3. น้ำมันพาราฟิน (Paraffin Oil)

#### ขั้นตอนการทดลอง

1. นำพาราฟินใส่ลงในบีกเกอร์ แล้วชั่งให้ได้ 200 กรัม
2. นำน้ำมันพาราฟินและแท่งแม่เหล็กกวนสารใส่ลงในหม้อต้ม จากนั้นตั้งหม้อต้มบนเครื่องกวนสารชนิดแม่เหล็กพร้อมให้ความร้อน
3. นำบีกเกอร์ที่มีพาราฟิน แช่ลงในน้ำมันพาราฟิน แล้วตั้งอุณหภูมิของเครื่องกวนสารชนิดแม่เหล็กพร้อมให้ความร้อนที่ 100 องศาเซลเซียส
4. เมื่ออุณหภูมิของน้ำมันพาราฟินเท่ากับ 100 องศาเซลเซียส ให้ความร้อนต่อไปจนพาราฟินหลอมเหลวหมดหลังจากนั้นหยุดให้ความร้อนแก่น้ำมันพาราฟิน
5. ใช้เทอร์โมคัปเปิลวัดอุณหภูมิทั้งหมด 3 จุด ได้แก่ อุณหภูมิของน้ำมันพาราฟิน อุณหภูมิของพาราฟินบริเวณด้านข้างของบีกเกอร์ และอุณหภูมิของพาราฟินบริเวณตรงกลางบีกเกอร์ ทุก ๆ 5 นาที จนกว่าอุณหภูมิของพาราฟินจะกลับมาเท่ากับอุณหภูมิเริ่มต้น
6. ทำการทดลองข้อ 1-5 ซ้ำ แต่เปลี่ยนจากพาราฟินเป็นไชคาร์นوبا

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 ชุดการทดลองตรวจสอบจุดหลอมเหลวของวัสดุเปลี่ยนสถานะ

### 3.2 ระบบกักเก็บความร้อนของพาราฟิน เมื่อนำพาราฟินใส่ลงในถังกักเก็บสารวัสดุและอุปกรณ์

1. เครื่องกักเก็บความร้อนจากแสงอาทิตย์ชนิดหลอดสุญญากาศ ประกอบด้วยหลอดแก้วสุญญากาศจำนวน 20 หลอด
2. ถังกักเก็บสาร
3. เทอร์โมคัปเปิล
4. บั้ม
5. ขวดแก้ว

#### สารเคมี

1. พาราฟิน (Paraffin Wax)
2. โพรพิลีน ไกลคอล (Propylene Glycol)

#### ขั้นตอนการทดลอง

1. นำโพรพิลีน ไกลคอลจำนวน 20 กิโลกรัมใส่ลงในถังกักเก็บสาร
2. นำพาราฟินใส่ลงในขวดแก้ว ขวดละ 200 กรัม แล้วนำขวดแก้วที่มีพาราฟินใส่ลงในถังกักเก็บสารจำนวน 5 ขวด



รูปที่ 3.2 ขวดแก้วที่มีพาราฟิน

3. เปิดปั๊มเวลา 9.00 น. โดยตั้งค่าอัตราการไหลของโพรพิลีน ไกลคอลเท่ากับ 100 ลิตรต่อชั่วโมง
4. ใช้เทอร์โมคัปเปิลวัดอุณหภูมิของโพรพิลีน ไกลคอลภายในถังกักเก็บสารทุก ๆ 30 นาทีเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
5. ปิดปั๊มเวลา 16.00 น.
6. ทำการทดลองข้อ 1-5 ซ้ำ แต่เปลี่ยนจำนวนขวดแก้วที่มีพาราฟินจาก 5 ขวด เป็น 10 ขวด

### 3.3 การตรวจวัดค่าคุณสมบัติทางความร้อนของไซคาร์บอนา

ตรวจวัดความร้อนแฝงการหลอมเหลว (Heat of fusion) ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของสาร NETZSCH DSC 204 F1



รูปที่ 3.3 เครื่องมือวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของสาร NETZSCH DSC 204 F1

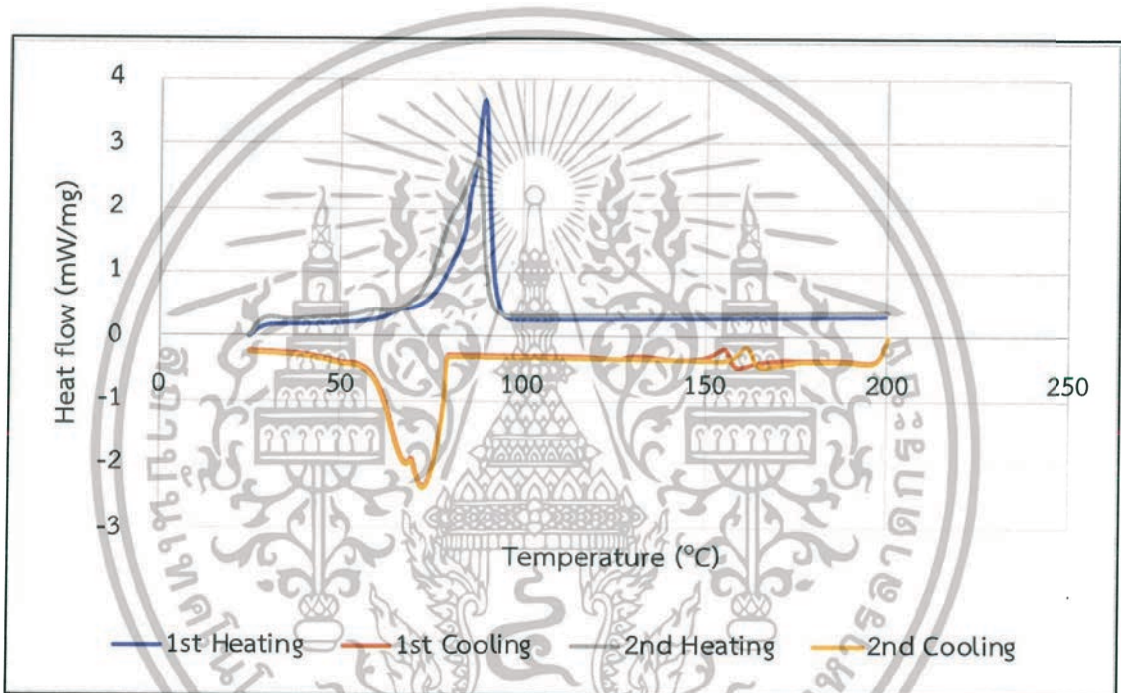
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

#### 4.1 ผลการวิเคราะห์ค่าความร้อนแฝงการหลอมเหลวของไซคาร์บอนบา

การวิเคราะห์ค่าความร้อนแฝงการหลอมเหลวของไซคาร์บอนบา สามารถวิเคราะห์ได้โดยเครื่องมือวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของสาร NETZSCH DSC 204 F1 ซึ่งใช้อัตราการให้ความร้อนและอัตราการเย็นตัวที่ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที และแก๊สที่ใช้ในการทดลอง คือ แก๊สไนโตรเจน เพื่อศึกษาลักษณะการดูดซับความร้อนระหว่างการเปลี่ยนสถานะของไซคาร์บอนบา



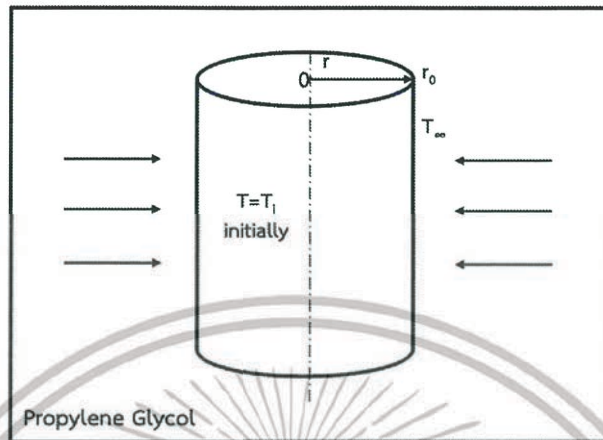
รูปที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ไซคาร์บอนบาด้วยเครื่องมือวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของสาร NETZSCH DSC 204 F1

จากรูปที่ 4.1 แสดงผลการวิเคราะห์ไซคาร์บอนบาด้วยเครื่องมือวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของสาร NETZSCH DSC 204 F1 ซึ่งแกน x คือ อุณหภูมิ และแกน y คือ ค่าของความแตกต่างของปริมาณความร้อนของอุปกรณ์ให้ความร้อนทั้งสอง ณ อุณหภูมิใดอุณหภูมิหนึ่ง ส่วนพื้นที่ใต้กราฟของแต่ละกราฟ จะบอกถึงค่าความร้อนแฝงการหลอมเหลวของสาร ซึ่งการให้ความร้อนครั้งที่ 1 การเย็นตัวครั้งที่ 1 การให้ความร้อนครั้งที่ 2 และการเย็นตัวครั้งที่ 2 มีพื้นที่ใต้กราฟเท่ากับ 179.9 -170.1 170.4 และ -173.0 J/g ตามลำดับ เมื่อนำไปหาค่าเฉลี่ย จะได้ค่าความร้อนแฝงการหลอมเหลวของไซคาร์บอนบาเท่ากับ 173.4 J/g

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 การหาเวลาที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิวัสดุเปลี่ยนสถานะจนถึงจุดหลอมเหลว ณ จุดกึ่งกลางของวัสดุ

โพรพิลีน ไกลคอลถ่ายเทความร้อนให้กับวัสดุเปลี่ยนสถานะแบบหนึ่งมิติในแนวรัศมี ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ลักษณะการถ่ายเทความร้อนของวัสดุเปลี่ยนสถานะ

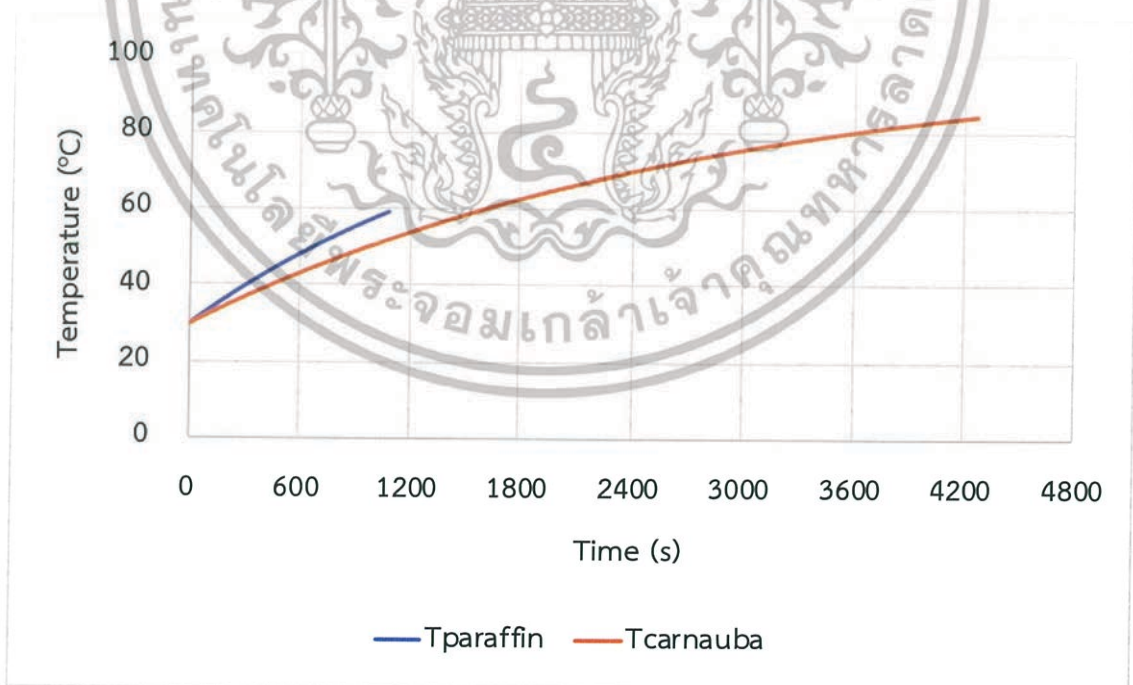
สมมติฐานในการคำนวณ

1. การถ่ายเทความร้อนผ่านทรงกระบอกแบบหนึ่งมิติในแนวรัศมี
2. วัสดุเปลี่ยนสถานะไม่มีการเปลี่ยนสถานะ
3. ไม่มีการสูญเสียความร้อน
4. อุณหภูมิของโพรพิลีน ไกลคอลมีค่าคงที่
5. ไม่มีความร้อนเกิดขึ้นในระบบ

ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณหาเวลาที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิวัสดุเปลี่ยนสถานะจนถึงจุดหลอมเหลว เมื่อโพรพิลีน ไกลคอลถ่ายเทความร้อนให้กับวัสดุเปลี่ยนสถานะ แสดงไว้ในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณหาเวลาที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิวัสดุเปลี่ยนสถานะจนถึงจุดหลอมเหลว เมื่อโพรพิลีน ไกลคอลถ่ายเทความร้อนให้กับวัสดุเปลี่ยนสถานะ

ข้อมูล	ค่า
พาราฟิน [18]	
ความหนาแน่น	900 kg/m <sup>3</sup>
ความจุความร้อนจำเพาะ ( $c_p$ )	2,900 J/(kg.K)
สัมประสิทธิ์การนำความร้อน ( $k$ )	0.24 W/(m.K)
ไซคาร์นوبا	
ความหนาแน่น [A]	998 kg/m <sup>3</sup>
ความจุความร้อนจำเพาะ ( $c_p$ ) [B]	1,458 J/(kg.K)
สัมประสิทธิ์การนำความร้อน ( $k$ ) [A]	0.15 W/(m.K)
ขนาดของวัสดุเปลี่ยนสถานะ	
เส้นผ่านศูนย์กลาง	3 cm
อุณหภูมิ	
อุณหภูมิโพรพิลีน ไกลคอล	100 °C
อุณหภูมิวัสดุเปลี่ยนสถานะเริ่มต้น	30 °C



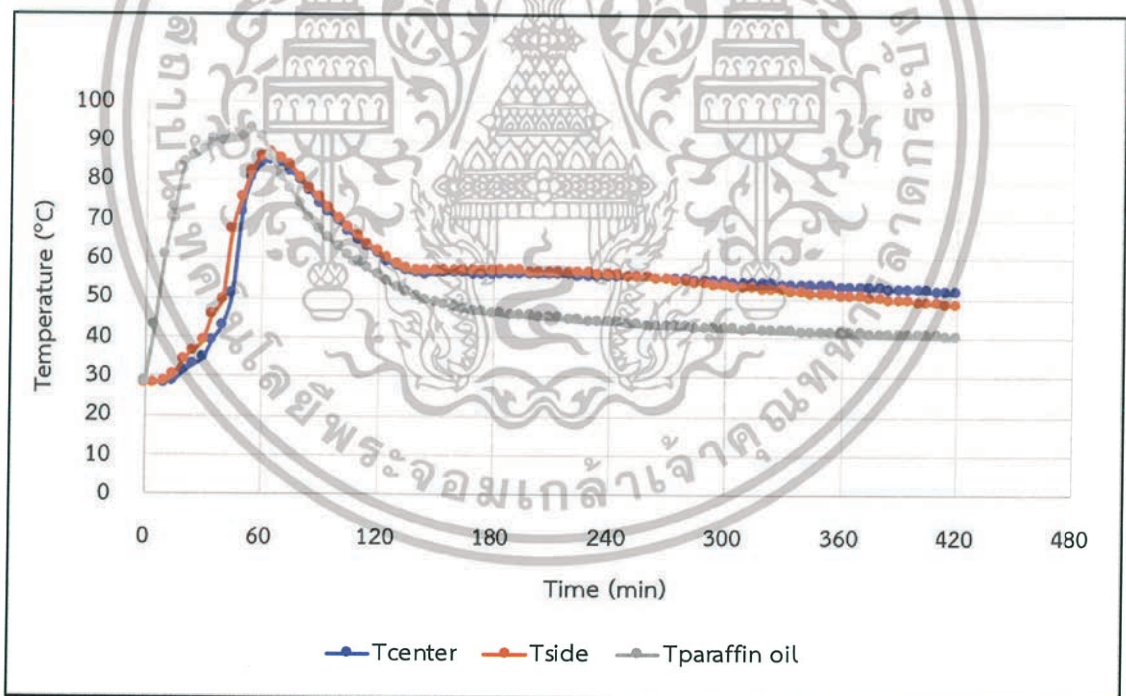
รูปที่ 4.3 กราฟระหว่างอุณหภูมิและเวลาของวัสดุเปลี่ยนสถานะ ณ ตำแหน่งจุดกึ่งกลางของวัสดุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

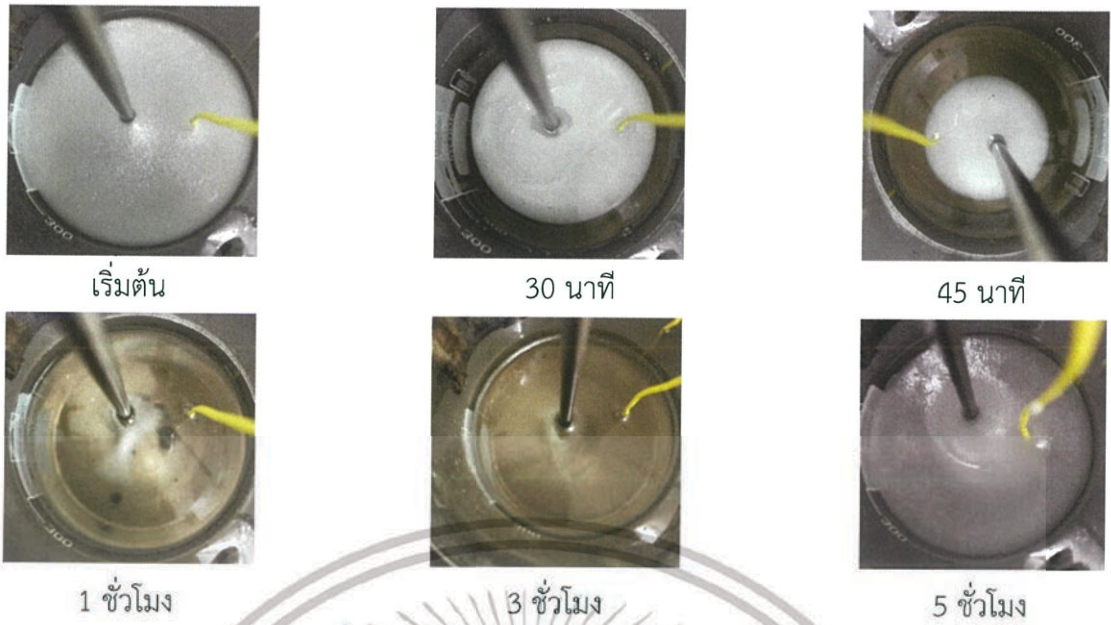
จากการคำนวณหาพลังงานที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิวัสดุเปลี่ยนสถานะให้ถึงจุดหลอมเหลว ด้วยสมการที่ 2.5 พบว่าพาราฟินและไฮคาร์บอนาใช้พลังงานเท่ากับ 16.2 และ 15.7 kJ ตามลำดับ และจากรูปที่ 4.3 แสดงกราฟระหว่างอุณหภูมิและเวลาของวัสดุเปลี่ยนสถานะ พบว่าเวลาที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิจนถึงจุดหลอมเหลว ณ จุดกึ่งกลางของวัสดุ ของพาราฟินและไฮคาร์บอนาเท่ากับ 18 และ 70 นาที ตามลำดับ และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ทางความร้อนของพาราฟินและไฮคาร์บอนามีค่าเท่ากับ  $9.19 \times 10^{-8}$  และ  $5.99 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$  ตามลำดับ แม้ว่าพลังงานที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิให้ถึงจุดหลอมเหลวของไฮคาร์บอนาจะมีค่าน้อยกว่าพาราฟิน แต่ไฮคาร์บอนามีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ทางความร้อนน้อยกว่าพาราฟิน จึงทำให้ไฮคาร์บอนาใช้เวลาในการเพิ่มอุณหภูมิให้ถึงจุดหลอมเหลวมากกว่าพาราฟิน

#### 4.3 การสังเกตลักษณะการหลอมเหลวและการถ่ายเทความร้อนของวัสดุเปลี่ยนสถานะ

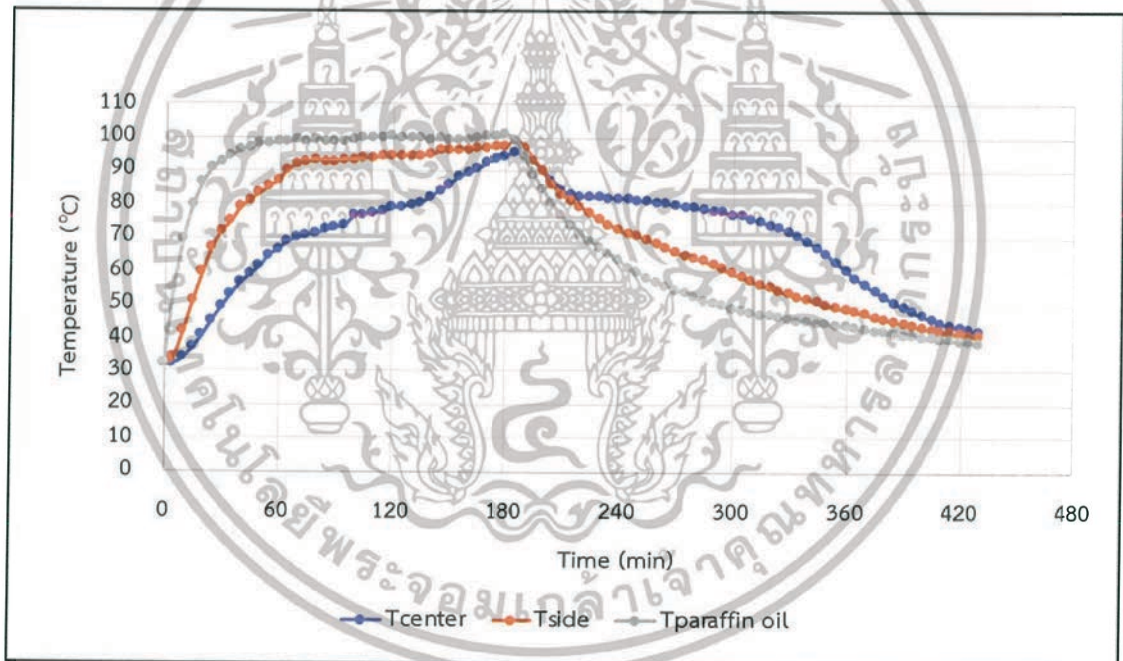
ทำการวัดอุณหภูมิของวัสดุเปลี่ยนสถานะทุก ๆ 5 นาที และสังเกตลักษณะการหลอมเหลวของวัสดุเปลี่ยนสถานะ หลังจากนั้นนำอุณหภูมิที่วัดได้มาสร้างกราฟระหว่างอุณหภูมิและเวลา จะได้กราฟระหว่างอุณหภูมิและเวลาและลักษณะการหลอมเหลวของวัสดุเปลี่ยนสถานะทั้งสองดังนี้



รูปที่ 4.4 กราฟระหว่างอุณหภูมิและเวลาของพาราฟิน

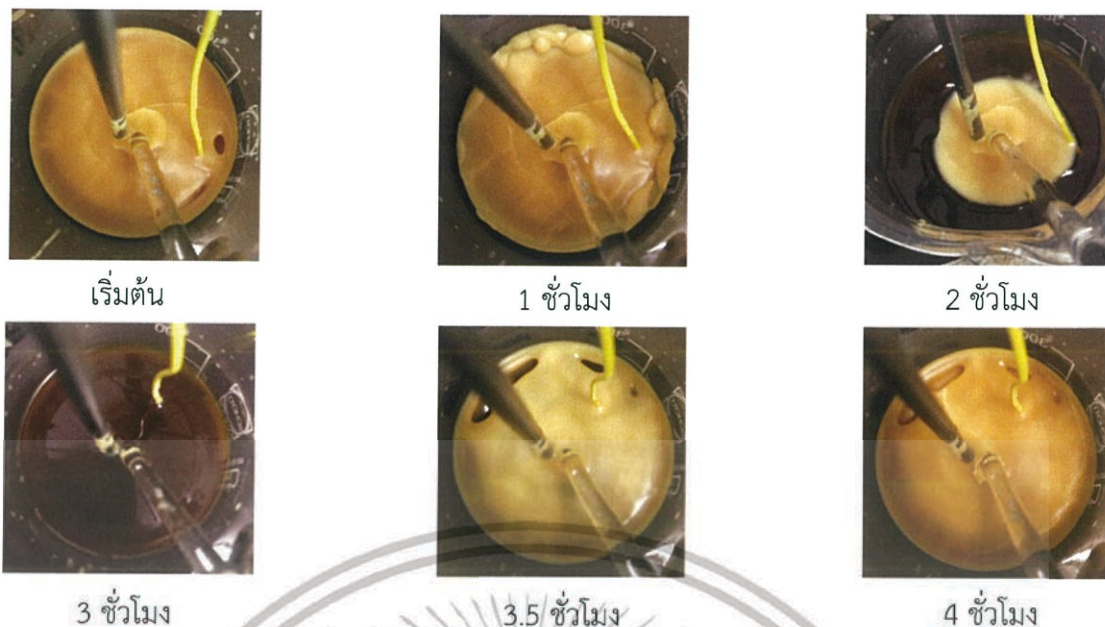


รูปที่ 4.5 ลักษณะการหลอมเหลวของพาราฟิน



รูปที่ 4.6 กราฟระหว่างอุณหภูมิและเวลาของไซคาร์บอนา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 ลักษณะการหลอมเหลวของไซคาร์นอบา

จากรูปที่ 4.4 แสดงกราฟระหว่างอุณหภูมิและเวลาของพาราฟิน และรูปที่ 4.5 แสดงลักษณะการหลอมเหลวของพาราฟิน พบว่าพาราฟิน เมื่อเวลาผ่านไป 1 ชั่วโมง พาราฟินเกิดการหลอมเหลวจนหมด และจากรูปที่ 4.6 แสดงกราฟระหว่างอุณหภูมิและเวลาของไซคาร์นอบาและรูปที่ 4.7 แสดงลักษณะการหลอมเหลวของไซคาร์นอบา พบว่าไซคาร์นอบา เมื่อเวลาผ่านไป 3 ชั่วโมง ไซคาร์นอบาเกิดการหลอมเหลวจนหมด จะเห็นได้ว่าไซคาร์นอบาใช้เวลาในการหลอมเหลวจนหมดนานกว่าพาราฟิน เนื่องจากไซคาร์นอบามีจุดหลอมเหลวสูงกว่าพาราฟิน

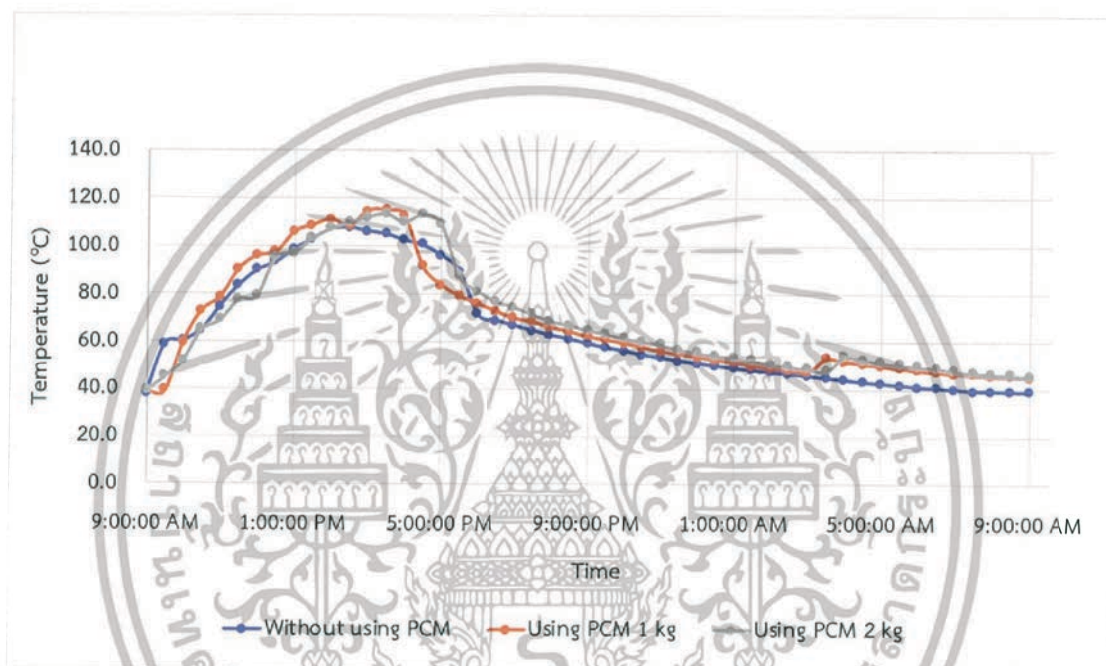
หลังจากนั้นหยุดให้ความร้อน เมื่อเวลาผ่านไป 4 ชั่วโมง ไซคาร์นอบากลับมาเป็นของแข็งจนหมด และเมื่อเวลาผ่านไป 5 ชั่วโมง พาราฟินกลับมาเป็นของแข็งจนหมด จะเห็นได้ว่าไซคาร์นอบาใช้เวลาในการกลับมาเป็นของแข็งน้อยกว่าพาราฟิน เนื่องจากไซคาร์นอบามีช่วงผลต่างระหว่างอุณหภูมิของสารกับจุดหลอมเหลวของสารน้อยกว่าพาราฟิน ทำให้อุณหภูมิลดลงมาถึงจุดหลอมเหลวเร็วกว่าพาราฟิน และไซคาร์นอบายังมีค่าความจุความร้อนจำเพาะและความร้อนแฝงการหลอมเหลวน้อยกว่าพาราฟินอีกด้วย จึงทำให้ไซคาร์นอบาสะสมความร้อนไว้ได้น้อยกว่าพาราฟิน

เมื่อนำผลการทดลองที่ 4.2 การคำนวณหาเวลาที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิจนถึงหลอมเหลวเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ 4.3 การสังเกตลักษณะการหลอมเหลวและการถ่ายเทความร้อนของวัสดุเปลี่ยนสถานะ พบว่าจากการคำนวณในทางทฤษฎี เวลาที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิจนถึงหลอมเหลวของพาราฟินและไซคาร์นอบามีค่าเท่ากับ 18 และ 70 นาที ตามลำดับ ส่วนในการทดลองที่ 4.3 เวลาที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิจนถึงหลอมเหลวของพาราฟินและไซคาร์นอบามีค่าเท่ากับ 25 และ 120 นาที ตามลำดับ จะเห็นว่าเวลาที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิจนถึงจุดหลอมเหลวของพาราฟินและไซคาร์นอบาที่ได้จากการทดลองมีค่ามากกว่าเวลาที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิจนถึงจุดหลอมเหลว

ของพาราฟินและไซคาร์บอนาที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี เพราะว่าในทางทฤษฎีระบบถูกสมมติให้ ไม่มีการสูญเสียความร้อนจากระบบสู่สิ่งแวดล้อม

#### 4.4 ระบบกักเก็บความร้อนของพาราฟิน เมื่อนำพาราฟินใส่ลงในถังกักเก็บสาร

นำพาราฟินใส่ลงในถังกักเก็บสาร จำนวน 1 และ 2 กิโลกรัม ตามลำดับ แล้ววัดอุณหภูมิของโพรพิลีน ไกลคอลในถังกักเก็บสารทุก ๆ 30 นาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำอุณหภูมิมาสร้างกราฟระหว่างอุณหภูมิกับเวลา จะได้กราฟแสดงดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.8 กราฟอุณหภูมิของโพรพิลีน ไกลคอลในถังกักเก็บความร้อน

จากรูปที่ 4.8 แสดงกราฟอุณหภูมิของโพรพิลีน ไกลคอลในถังกักเก็บสาร จะเห็นได้ว่าเมื่อผ่านไป 24 ชั่วโมง อุณหภูมิของโพรพิลีน ไกลคอล กรณีที่ไม่ได้ใส่พาราฟิน ใส่พาราฟิน 1 กิโลกรัม และใส่พาราฟิน 2 กิโลกรัมลงในถังกักเก็บสารมีค่าเท่ากับ 39.2 45.7 และ 46.5 องศาเซลเซียสตามลำดับ อุณหภูมิของโพรพิลีน ไกลคอลในถังกักเก็บสาร กรณีที่ใส่พาราฟินเป็นวัสดุเปลี่ยนสถานะจะมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิของโพรพิลีน ไกลคอลในถังกักเก็บสาร กรณีที่ไม่ใส่พาราฟินเป็นวัสดุเปลี่ยนสถานะ เนื่องจากในช่วงเวลา 03.00 – 03.30 น. พาราฟินเกิดการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวกลายเป็นของแข็ง ทำให้พาราฟินคายความร้อนแฝงการหลอมเหลวให้กับโพรพิลีน ไกลคอล อุณหภูมิของโพรพิลีนไกลคอลจึงสูงขึ้น

การใส่พาราฟิน 1 และ 2 กิโลกรัม ลงในถังกักเก็บสาร พบว่าอุณหภูมิของโพรพิลีน ไกลคอลในถังที่ใส่พาราฟิน 2 กิโลกรัม มีค่าสูงกว่าอุณหภูมิของโพรพิลีน ไกลคอลในถังที่ใส่พาราฟิน 1 กิโลกรัม เนื่องจากการใส่ปริมาณพาราฟินที่เพิ่มขึ้น ทำให้สามารถกักเก็บความร้อนได้มากขึ้นด้วย ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ 2.2 และยังคงขึ้นอยู่กับสภาพอากาศที่ทำการทดลองในแต่ละวัน

และประสิทธิภาพของเครื่องกักเก็บความร้อนจากแสงอาทิตย์ชนิดหลอดสุญญากาศ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.6 พบว่าเครื่องกักเก็บความร้อนจากแสงอาทิตย์ชนิดหลอดสุญญากาศกรณีที่ไม่ได้ใส่พาราฟิน ใส่พาราฟิน 1 และ 2 กิโลกรัม มีประสิทธิภาพเท่ากับ 11.8 13.8 และ 14.2 % ตามลำดับ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการทดลองการสังเกตลักษณะการหลอมเหลวและการถ่ายเทความร้อนของวัสดุเปลี่ยนสถานะ 2 ชนิด ได้แก่ พาราฟินและไซคาร์บอนา โดยทำการให้ความร้อนและวัดอุณหภูมิของวัสดุเปลี่ยนสถานะทั้งสองทุก ๆ 5 นาที และเมื่อวัสดุเปลี่ยนสถานะหลอมเหลวจนหมด จะหยุดให้ความร้อน พบว่าพาราฟินหลอมเหลวจนหมดเร็วกว่าไซคาร์บอนาและใช้เวลาในการกลับมาเป็นของแข็งนานกว่าพาราฟิน ดังนั้นพาราฟินเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในระบบทำน้ำร้อน อุณหภูมิ 50 °C

การทดลองระบบกักเก็บความร้อนของพาราฟิน เมื่อนำพาราฟินใส่ลงในถังกักเก็บสาร โดยทำการวัดอุณหภูมิของโพรพิลีน ไกลคอล ทุก ๆ 30 นาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่ากรณีที่ใส่พาราฟิน 2 กิโลกรัมลงในถังกักเก็บสารสามารถรักษาอุณหภูมิไว้ได้สูงที่สุด

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

ในการทดลองระบบกักเก็บความร้อนของพาราฟิน เมื่อนำพาราฟินใส่ลงในถังกักเก็บสาร ปริมาณพาราฟินที่ใส่ลงในถังกักเก็บสารอาจจะยังไม่ใช้ปริมาณที่เหมาะสมที่สุด ดังนั้นจึงควรศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับปริมาณพาราฟินที่เหมาะสมที่ใส่ลงในถังกักเก็บสาร และศึกษาการนำโพรพิลีน ไกลคอลไปใช้แลกเปลี่ยนความร้อนให้กับสารใด ๆ เพื่อนำไปใช้ในการออกแบบระบบทำน้ำร้อนต่อไป

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Jack P. Holman. (2001). Heat Transfer Ninth Edition. McGraw-Hill Series in Mechanical Engineering.
- [2] Singh RV, Kumar S, Hasan M, Khan ME, Tiwari G. Performance of a solar still integrated with evacuated tube collector in natural mode. Desalination 2013;318:25–33.
- [3] Wei X. Evaluation of the efficiency of evacuated tube solar thermal collector based on finite element analysis. Southeastern Louisiana University;2010.
- [4] Kalogirou SA. Solar thermal collectors and applications. Prog Energy Combust Sci 2004;30:231–95.
- [5] Sharma N, Diaz G. Performance model of a novel evacuated-tube solar collector based on minichannels. Sol Energy 2011;85:881–90.
- [6] Kalogirou SA. Solar energy engineering: processes and systems. Academic Press; 2013.
- [7] Tyagi V, Kaushik S, Tyagi S. Advancement in solar photovoltaic/thermal (PV/T) hybrid collector technology. Renew Sust Energ Rev 2012;16:1383–98.
- [8] Mehta J, Rane M. Liquid desiccant based solar air conditioning system with novel evacuated tube collector as regenerator. Proc Eng 2013;51:688–93.
- [9] Sakhrieh A, Al-Ghandoor A. Experimental investigation of the performance of five types of solar collectors. Energy Convers Manag 2013;65:715–20.
- [10] Sharma S, Iwata T, Kitano H, Sagara K. Thermal performance of a solar cooker based on an evacuated tube solar collector with a PCM storage unit. Sol Energy 2005.
- [11] Kalogirou S. The potential of solar industrial process heat applications. Appl Energy 2003;76:337–61.
- [12] Madduri A, Loeder D, Beutler N, He M, Sanders S. Concentrated evacuated tubes for solar-thermal energy generation using stirling engine. Energytech, 2012 IEEE. IEEE;2012. P.1–6.
- [13] Sharma A, Chen C, VuLan N. Solar-energy drying systems: a review. Renew Sust Energy Rev 2009;13:1185–210.
- [14] Kalogirou SA. Solar energy engineering: processes and systems. Academic Press; 2013.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [15] Vendan S, Shunmuganathan L, Manojkumar T, Thanu CS. Study on design of an evacuated tube solar collector for high temperature steam generation. *Int J Emerg Tach Adv Eng* 2012;2.
- [16] Sharma, A.; Tyagi, V.; Chen, C.; Buddhi, D. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renew. Sustainable Energy Rev.* 2009, 13, 318-345.
- [17] Tatsidjodoung, P.; Pierres, N. L.; Luo, L. A Review of potential materials for thermal energy storage in building applications. *Renew. Sustainable Energy Rev.* 2013, 18, 327-349
- [18] กัญรินทร์ โหละสุต และคณะ. 2551. วัสดุเปลี่ยนเฟสเพื่อช่วยรักษาความร้อนในเครื่องอบพลังงานแสงอาทิตย์. ผลงานวิจัย การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 22.
- [19] Steinle J.,Vernon. “Carnauba wax; an expediton to its source”. *Industrial and Engineering Chemistry.* 28(9):1004-1008.
- [20] Science Lab. Material Safety Data Sheet Carnauba wax MSDS. Retrived December9,2018,from <http://www.sciencelab.com/msds.php?msdsId=9923319>
- [21] WAXES: CARNAUBA. Retrived April 8, 2019 ,from <https://m.cameochemicals.noaa.gov/chris/WCA.pdf>
- [22] Mingzhu Xia, Yanping Yuan, Xudong Zhao, Xiaoling Cao, Zhonghua Tang. Cold storage Condensation Heat Recovery System with a Novel Phase Change Composite Material 2016.
- [23] Yunus A. Cengel. *Heat and Mass Transfer* 5th edition. McGraw-Hill Education (Asia).



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

## ข้อมูลดิบ

ก.1 ข้อมูลการทดลองการสังเกตลักษณะการหลอมเหลวและการถ่ายเทความร้อนของวัสดุเปลี่ยนสถานะ

ตารางที่ ก.1 อุณหภูมิของพาราฟิน ณ เวลาต่าง ๆ

Time (min)	$T_{center}$	$T_{side}$	$T_{paraffin\ oil}$
0	28.2	28.1	28.5
5	28.2	28.2	42.6
10	28.3	28.5	60.7
15	28.8	30.1	72.6
20	31.1	34.1	84.2
25	32.8	36.4	85.9
30	34.6	39	87.7
35	39.2	45.7	90.5
40	43	49.2	89.8
45	50.7	67.1	90.1
50	71.5	75.4	90.8
55	80.6	82.3	92.8
60	84.1	86.1	90.9
65	85	87	85.9
70	84.2	85.6	81
75	82.1	83.5	77.8
80	80	80.5	73.7
85	77.2	77.7	69.9
90	73.9	75.3	67.3
95	71.8	72.8	65.1
100	69.3	70.2	62.9
105	66.9	67.8	60.9
110	64.8	65.6	59
115	63	63.7	57.4
120	61.2	61.8	56
125	59.4	60.1	54.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Time (min)	$T_{center}$	$T_{side}$	$T_{paraffin\ oil}$
130	57.8	58.4	52.7
135	56.8	57.3	51.6
140	56.3	56.9	50.6
145	56.1	56.8	49.6
150	56.2	56.9	49
155	56.3	56.9	48.5
160	56.3	57	47.5
165	56.3	57	47
170	56.1	56.9	46.7
175	56.1	56.9	46.4
180	56	56.8	46.2
185	56	56.8	45.9
190	56	56.8	45.6
195	56	56.8	45.5
200	55.9	56.7	45.3
205	55.8	56.5	45
210	55.7	56.5	44.9
215	55.8	56.5	44.9
220	55.7	56.4	44.6
225	55.6	56.2	44.2
230	55.5	56.2	44.1
235	55.5	56	44
240	55.5	55.8	43.8
245	55.3	55.7	43.7
250	55.2	55.5	43.3
255	55.1	55.3	43.2
260	55.1	55.1	42.9
265	54.9	55	42.8
270	54.8	54.7	42.8
275	54.6	54.5	42.7
280	54.6	54.2	42.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Time (min)	$T_{center}$	$T_{side}$	$T_{paraffin\ oil}$
285	54.5	53.9	42.4
290	54.3	53.6	42.5
295	54.3	53.2	42.2
300	54	52.9	42.2
305	53.7	52.8	42.1
310	53.6	52.6	41.9
315	53.6	52.5	42
320	53.6	52.3	41.8
325	53.5	52.1	41.7
330	53.4	51.9	41.6
335	53.3	51.6	41.5
340	53.2	51.4	41.4
345	53.1	51.2	41.3
350	53	51	41.2
355	52.9	50.8	41.1
360	52.8	50.6	41
365	52.7	50.4	41
370	52.6	50.2	40.9
375	52.5	49.9	40.8
380	52.4	49.7	40.7
385	52.3	49.5	40.6
390	52.2	49.3	40.6
395	52.1	49.2	40.5
400	52	49	40.5
405	51.8	48.7	40.4
410	51.7	48.6	40.4
415	51.5	48.4	40.2
420	51.4	48.2	40.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.2 อุณหภูมิของไซคาร์บอนบา ณ เวลาต่าง ๆ

Time (min)	T <sub>center</sub>	T <sub>side</sub>	T <sub>paraffin oil</sub>
0	31.9	32	32.4
5	32.3	34.1	54.5
10	33.9	41.9	69.4
15	36.9	50.9	79.4
20	40.6	59.3	86.1
25	45.1	66.9	90.4
30	49.1	71.6	92.6
35	53	74.7	94.2
40	56.2	78.8	95.8
45	58.9	81.1	96.6
50	61.1	83	97.7
55	64.5	85.1	97.9
60	66.3	87	98.2
65	68.7	90.1	98.3
70	69.6	91.8	98.8
75	70.6	92.3	98.4
80	71.1	93	98.8
85	72.1	92.4	98.7
90	72.9	92.6	98.6
95	73.6	92.9	98.7
100	76.3	93.1	99.1
105	76.7	93.4	99.4
110	77.2	93.7	99.8
115	77.7	94	99.8
120	78.7	94.3	100.1
125	79.1	94.3	99.6
130	79.8	94.4	99.6
135	80.5	94.5	99.7
140	82.2	94.7	99
145	84.1	95.8	99.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Time (min)	T <sub>center</sub>	T <sub>side</sub>	T <sub>paraffin oil</sub>
150	85.9	96	98.8
155	88	96.2	99.3
160	89.1	96.2	99.3
165	90.4	96.5	100
170	92.1	96.8	100.4
175	93.4	97.1	100.5
180	94.3	97.2	100.8
185	95.5	99.1	99.2
190	94.3	96.8	94
195	92.7	93.3	89
200	89.9	89.7	84.2
205	86.9	85.8	80
210	83.9	82.7	76.3
215	82.5	80.8	73.3
220	82.1	79	71.2
225	81.9	77.1	68.8
230	81.9	75.3	66.9
235	81.7	73.7	65.2
240	81.5	72.2	63.3
245	81.3	70.8	60.6
250	81	70.4	59.4
255	80.7	69.3	57.7
260	80.3	68.2	56.6
265	80	66.9	55.5
270	79.5	65.6	54.1
275	79.2	64.5	53.6
280	78.7	63.8	52
285	78.4	63	51.1
290	77.9	61.8	50.2
295	77.5	60.5	49.5
300	76.8	59.3	48.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Time (min)	$T_{\text{center}}$	$T_{\text{side}}$	$T_{\text{paraffin oil}}$
305	76.3	58.2	48.2
310	75.5	57	47.6
315	74.6	56	47
320	73.7	55	46.5
325	72.8	54.1	46.2
330	71.7	53.2	45.7
335	70.2	52.4	45.2
340	68.6	51.5	44.9
345	66.8	50.8	44.4
350	64.7	50	44.2
355	62.3	49.3	43.8
360	60	48.6	43.4
365	57.7	47.9	42.9
370	55.7	47.2	42.6
375	53.8	46.4	42.1
380	52.2	45.8	41.6
385	50.6	45	41.2
390	49	44.4	40.8
395	47.7	43.8	40.5
400	46.6	43.2	40.1
405	45.6	42.6	39.8
410	44.6	42.1	39.5
415	43.8	41.6	39.3
420	43.1	41.3	39.1
425	42.4	40.9	38.7
430	41.9	40.5	38.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.2 ระบบกักเก็บความร้อนของพาราฟิน เมื่อนำพาราฟินใส่ลงในถังเก็บสาร  
ตารางที่ ก.3 อุณหภูมิของโพรพิลีน ไกลคอล ณ ช่วงเวลาต่าง ๆ กรณีไม่ได้ใส่พาราฟิน

เวลา	ครั้งที่				
	1	2	3	4	5
9:00:00 AM	37.9	35.5	35.3	34.6	38.9
9:30:00 AM	58.9	48.3	40.2	59.4	64.6
10:00:00 AM	60.4	57.9	59.3	64.6	76.4
10:30:00 AM	64.9	62.2	62.7	70.1	81.7
11:00:00 AM	74.9	76.5	75.8	82.1	84.2
11:30:00 AM	83.7	83.8	79.8	92.2	88.9
12:00:00 PM	90	91.1	87.2	95.1	91.3
12:30:00 PM	93.5	94.3	89.8	99.4	93.6
1:00:00 PM	99	100.2	90.4	102.9	99
1:30:00 PM	103.2	104.6	91.1	107.5	99.8
2:00:00 PM	107.5	108.6	93.4	109.1	99.7
2:30:00 PM	108.1	107	95.7	113.1	102.3
3:00:00 PM	106.6	105.3	91.9	112	100.4
3:30:00 PM	105.4	103.7	88.8	112.2	95.6
4:00:00 PM	102.9	103.5	82.6	111.9	92.5
4:30:00 PM	100.8	100.4	77.3	107.4	88.9
5:00:00 PM	96.5	96.2	66.8	105.6	83.3
5:30:00 PM	89.9	88.9	64.5	101.9	69.7
6:00:00 PM	71.7	71.3	62.9	94.8	68.3
6:30:00 PM	69.1	68.9	61.7	81.4	67.4
7:00:00 PM	67	66.3	59.8	74.3	65.9
7:30:00 PM	64.9	64.6	58.5	71.4	64.7
8:00:00 PM	62.9	62.6	56.9	66.9	63.4
8:30:00 PM	61.3	60.9	55.3	64.8	61.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เวลา	ครั้งที่				
	1	2	3	4	5
9:00:00 PM	59.4	59.1	54.2	63.5	58.8
9:30:00 PM	57.7	57.6	53.2	61.3	57.2
10:00:00 PM	56.3	56	52.4	59.8	55.8
10:30:00 PM	54.7	54.7	51.4	58.3	54.4
11:00:00 PM	53.4	53.1	50.2	56.9	52.1
11:30:00 PM	52.2	52.1	49.8	55.5	51.6
12:00:00 AM	51.2	50.9	48.8	54.6	49.2
12:30:00 AM	50.3	50.2	48.3	53.6	48.2
1:00:00 AM	49.2	49.2	47.2	52.3	47.3
1:30:00 AM	48.4	48.2	46.6	51.8	46.4
2:00:00 AM	47.5	47.6	45.3	50.6	45.9
2:30:00 AM	46.8	46.7	44.8	49.4	44.3
3:00:00 AM	46	45.9	44.2	48.8	43.5
3:30:00 AM	45.1	44.9	43.4	48.2	43.3
4:00:00 AM	44.3	44.1	42.5	47.1	42.2
4:30:00 AM	43.4	43.3	42	46.3	41.4
5:00:00 AM	42.7	42.5	41.7	45.4	40.6
5:30:00 AM	42	41.9	41.3	44.7	40.5
6:00:00 AM	41.3	41.3	40.8	43.9	40.2
6:30:00 AM	40.9	40.7	40.5	43.3	40.2
7:00:00 AM	40.2	40.2	39.9	42.9	40.2
7:30:00 AM	39.8	39.8	39.3	42.2	40.3
8:00:00 AM	39.6	39.4	38.8	41.4	40.2
8:30:00 AM	39.3	39.2	38.2	40.6	39.8
9:00:00 AM	39.2	39.2	38.4	40.2	40.2
<b>ค่ามากที่สุด</b>	108.1	108.6	95.7	113.1	102.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.4 อุณหภูมิของโพรพิลีน ไกลคอล ณ ช่วงเวลาต่าง ๆ กรณีใส่พาราฟิน 1 กิโลกรัม

เวลา	ครั้งที่				
	1	2	3	4	5
9:00:00 AM	39.2	36.4	42.5	41.3	40.2
9:30:00 AM	39.1	50.1	60.2	49.1	62.3
10:00:00 AM	59.8	59.4	65.8	67.2	70.5
10:30:00 AM	73.1	68.3	73.0	77.8	72.9
11:00:00 AM	78.7	72.9	79.0	79.4	79.2
11:30:00 AM	90.5	79.2	88.7	96.0	87.0
12:00:00 PM	96.0	87.0	93.1	97.4	92.5
12:30:00 PM	97.5	92.5	97.6	103.4	97.1
1:00:00 PM	105.9	97.1	103.3	107.5	106.7
1:30:00 PM	108.8	102.3	107.8	110.1	108.1
2:00:00 PM	111.1	106.7	106.9	112.4	106.2
2:30:00 PM	108.5	108.1	105.6	113.7	106.4
3:00:00 PM	114.8	106.2	105.6	114.3	103.9
3:30:00 PM	115.0	106.4	104.0	113.4	102.1
4:00:00 PM	112.8	103.9	101.5	109.4	98.5
4:30:00 PM	91.7	102.1	97.8	88.8	92.2
5:00:00 PM	84.0	98.5	91.0	81.6	74.3
5:30:00 PM	79.4	92.2	72.1	77.3	70.3
6:00:00 PM	76.3	74.3	69.7	74.2	67.8
6:30:00 PM	73.1	70.3	67.6	72.1	65.7
7:00:00 PM	70.2	67.8	65.2	69.1	63.6
7:30:00 PM	68.6	65.7	63.1	67.1	61.8
8:00:00 PM	66.4	63.6	61.6	63.7	60.1
8:30:00 PM	64.6	61.8	59.5	62.0	58.1
9:00:00 PM	62.5	60.1	58.0	60.4	56.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เวลา	ครั้งที่				
	1	2	3	4	5
9:30:00 PM	61.3	58.1	56.4	59.1	55.1
10:00:00 PM	59.8	56.7	55.0	57.2	53.7
10:30:00 PM	58.2	55.1	53.8	55.8	52.4
11:00:00 PM	56.4	53.7	52.4	54.8	51.5
11:30:00 PM	55.2	52.8	51.3	53.5	50.5
12:00:00 AM	54.0	51.5	54.5	52.5	49.5
12:30:00 AM	52.9	50.5	53.3	51.5	48.8
1:00:00 AM	51.9	52.5	52.5	50.2	51.8
1:30:00 AM	50.7	51.8	51.6	49.3	51.1
2:00:00 AM	49.7	50.8	51.0	48.4	50.3
2:30:00 AM	48.9	50.1	50.2	54.1	49.5
3:00:00 AM	48.0	49.3	49.3	52.7	48.5
3:30:00 AM	53.3	48.5	48.3	51.9	47.6
4:00:00 AM	52.3	47.5	47.4	51.0	46.9
4:30:00 AM	51.5	46.6	46.8	50.1	46.2
5:00:00 AM	50.5	45.9	46.1	49.1	45.6
5:30:00 AM	49.6	45.2	45.5	48.4	45.0
6:00:00 AM	48.7	44.6	44.9	47.6	44.5
6:30:00 AM	48.0	44.0	44.5	47.2	44.0
7:00:00 AM	47.4	43.5	44.0	47.1	43.6
7:30:00 AM	46.8	43.0	43.6	46.9	43.4
8:00:00 AM	46.3	42.6	43.3	46.6	43.1
8:30:00 AM	46.0	42.4	43.1	46.5	42.8
9:00:00 AM	45.7	42.1	43.1	46.3	42.7
<b>ค่ามากที่สุด</b>	115.0	108.1	107.8	114.3	108.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.5 อุณหภูมิของโพพริลีน ไกลคอล ณ ช่วงเวลาต่าง ๆ กรณีใส่พาราฟิน 2 กิโลกรัม

เวลา	ครั้งที่				
	1	2	3	4	5
9:00:00 AM	39.5	40.6	38.2	39.0	44.1
9:30:00 AM	45.2	49.1	48.9	55.0	51.3
10:00:00 AM	52.2	53.0	53.5	67.4	54.4
10:30:00 AM	65.1	55.3	67.2	81.1	56.3
11:00:00 AM	69.2	57.8	73.4	81.4	59.6
11:30:00 AM	77.8	61.9	83.9	88.9	64.9
12:00:00 PM	79.4	66.8	87.9	93.7	68.9
12:30:00 PM	95.5	71.3	93.4	95.3	74.2
1:00:00 PM	97.4	77.1	98.4	95.6	79.4
1:30:00 PM	103.4	81.6	99.5	95.8	83.5
2:00:00 PM	107.5	84.5	100.0	95.5	84.4
2:30:00 PM	110.1	84.6	100.8	94.8	84.6
3:00:00 PM	112.4	84.2	99.9	94.2	83.9
3:30:00 PM	113.7	83.0	99.1	88.0	81.4
4:00:00 PM	110.3	79.7	98.1	80.9	77.8
4:30:00 PM	113.4	76.2	89.7	78.4	74.6
5:00:00 PM	109.4	73.1	82.3	73.2	71.6
5:30:00 PM	87.5	70.1	74.7	71.0	68.5
6:00:00 PM	81.6	66.8	70.2	69.8	65.5
6:30:00 PM	77.3	64.2	67.1	66.9	62.6
7:00:00 PM	74.9	61.9	65.5	64.5	60.8
7:30:00 PM	71.8	59.9	64.7	63.0	58.9
8:00:00 PM	69.1	58.3	62.8	61.5	57.5
8:30:00 PM	67.2	56.8	61.4	60.7	56.1
9:00:00 PM	65.4	55.6	60.7	59.5	55.1

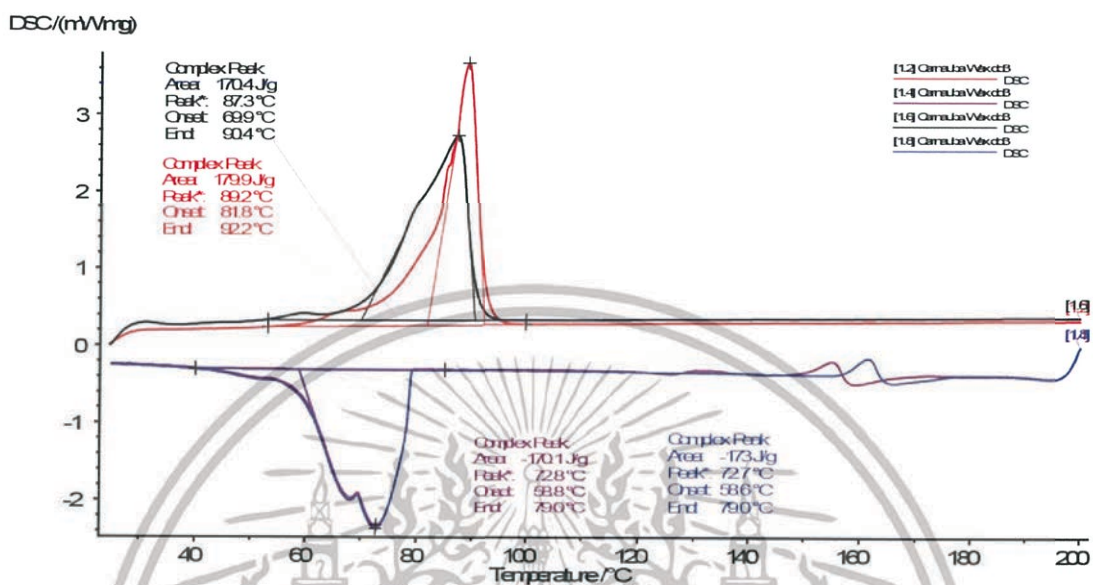
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เวลา	ครั้งที่				
	1	2	3	4	5
9:30:00 PM	63.7	54.6	59.4	57.7	53.5
10:00:00 PM	61.8	52.9	58.2	56.8	52.2
10:30:00 PM	60.4	51.7	57.1	55.5	51.2
11:00:00 PM	59.1	51.0	56.7	55.2	52.7
11:30:00 PM	57.2	50.4	55.8	54.5	52.0
12:00:00 AM	55.8	49.8	54.9	53.8	51.6
12:30:00 AM	54.6	49.2	54.4	52.6	51.0
1:00:00 AM	53.5	48.8	53.5	52.2	50.6
1:30:00 AM	52.5	48.4	53.4	51.6	50.2
2:00:00 AM	51.2	47.9	52.1	50.8	49.7
2:30:00 AM	50.2	47.5	51.3	50.3	49.3
3:00:00 AM	49.3	47.0	51.0	49.7	48.9
3:30:00 AM	48.4	46.5	50.6	53.1	48.4
4:00:00 AM	54.1	46.2	53.7	52.8	47.9
4:30:00 AM	52.8	45.7	52.8	51.4	46.6
5:00:00 AM	51.9	45.3	51.6	50.9	45.1
5:30:00 AM	51.0	44.9	50.4	49.2	44.6
6:00:00 AM	50.1	44.5	49.4	49.1	44.2
6:30:00 AM	49.7	44.1	49.1	48.7	43.9
7:00:00 AM	48.4	43.7	48.7	47.0	43.6
7:30:00 AM	47.6	43.4	47.4	46.6	43.3
8:00:00 AM	47.2	43.1	46.6	45.2	43.0
8:30:00 AM	46.6	43.0	46.5	44.8	42.8
9:00:00 AM	46.2	42.7	46.5	44.1	42.6
<b>ค่ามากที่สุด</b>	113.7	84.6	100.8	95.8	84.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

### ข้อมูลการวิเคราะห์ผล



รูปที่ ข.1 ผลการวิเคราะห์ไซคาร์บอนาด้วยเครื่องมือวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อน  
ของสาร NETZSCH DSC 204 F1

## ภาคผนวก ค

### เครื่องมือวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของสาร

#### (Differential scanning calorimetry, DSC)

#### ข้อมูลทั่วไป

เครื่องมือวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของสาร เป็นเครื่องมือวิเคราะห์ที่ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย ตั้งแต่ในอุตสาหกรรมเคมี พลาสติก อิเล็กทรอนิกส์ ยานยนต์ ไปจนถึงอาหารและยา โดยถูกนำไปประยุกต์ใช้ทั้งสำหรับการวิเคราะห์คุณภาพผลิตภัณฑ์และงานวิจัย เป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์ทดสอบวัสดุ โดยการวัดค่าพลังงานความร้อนและอุณหภูมิของสารตัวอย่างเปรียบเทียบกับสารมาตรฐาน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพหรือการเปลี่ยนแปลงทางเคมี ตัวอย่างของข้อมูลที่สามารถวิเคราะห์หรือออกมาได้ เช่น จุดหลอมเหลว (Melting point) อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, T<sub>g</sub>) ความเสถียรต่อปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation stability) จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยา (Reaction kinetics) และความบริสุทธิ์ (Purity)

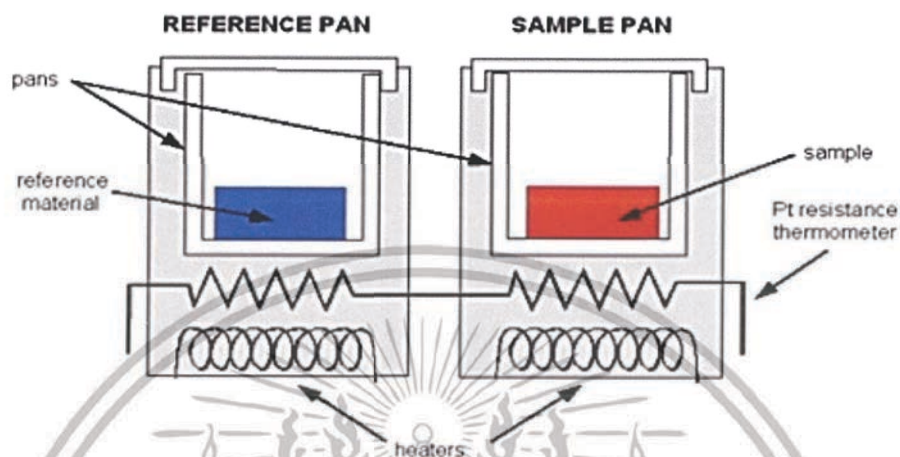
#### หลักการทำงาน

หลักการทำงานพื้นฐานของเครื่องมือวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของสาร คือ การนำถาด 2 ถาดมาทำการทดลอง ซึ่งถาดแรกเป็นถาดที่บรรจุสารตัวอย่าง (Sample pan) ส่วนถาดที่สองเป็นถาดอ้างอิง (Reference pan) ซึ่งเป็นถาดเปล่าวางอยู่บนอุปกรณ์ให้ความร้อน (Furnace) ซึ่งเป็นชนิดเดียวกันและวางอยู่ข้าง ๆ กัน เมื่อเริ่มการทดสอบ อุปกรณ์ให้ความร้อนจะเริ่มให้ความร้อนแก่ถาดทั้งสอง โดยเครื่องมือวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของสาร จะควบคุมอัตราการเพิ่มอุณหภูมิให้คงที่ แต่ที่สำคัญที่สุด คือ จะควบคุมให้อุปกรณ์ให้ความร้อนทั้งสองเพิ่มอุณหภูมิถาดทั้งสองที่วางแยกกัน ด้วยอัตราการเพิ่มความร้อนที่เท่ากันตลอดทั้งการทดสอบ ซึ่งสาเหตุที่ความร้อนของถาดทั้งสองจะเพิ่มด้วยอัตราที่ไม่เท่ากัน นั่นคือ ถาดที่บรรจุสารตัวอย่างมีตัวอย่างอยู่ข้างใน แต่ถาดอ้างอิงไม่มีสารใดอยู่ภายในเลย การมีสารตัวอย่างอยู่ข้างใน ทำให้ถาดที่บรรจุสารตัวอย่างมีตัวอย่างมีสารในปริมาณที่มากกว่าถาดอ้างอิง หมายความว่าอุปกรณ์ให้ความร้อนต้องให้ความร้อนแก่ถาดที่บรรจุสารตัวอย่างมากกว่าที่ให้ถาดอ้างอิง เพื่อที่จะคงอัตราการเพิ่มอุณหภูมิให้เท่ากัน ดังนั้นอุปกรณ์ให้ความร้อนที่อยู่ใต้ถาดที่บรรจุสารตัวอย่าง จะต้องทำงานหนักกว่าอุปกรณ์ให้ความร้อนที่อยู่ใต้ถาดอ้างอิง และการวัดความแตกต่างของปริมาณความร้อนจากอุปกรณ์ให้ความร้อนทั้งสองนี้ก็คือหน้าที่หลักของเครื่องมือวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของสาร

ความร้อนที่ใส่สารตัวอย่าง (Heat flow) มีค่าสอดคล้องกับพลังงานที่ให้สารตัวอย่าง และถูกวัดในหน่วยมิลลิวัตต์ (mW) เมื่อนำค่าพลังงานมาคูณด้วยเวลา ผลลัพธ์ที่ได้คือปริมาณพลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ถูกแสดงในหน่วยมิลลิวัตต์วินาที (mW s) หรือมิลลิจูลล์ (mJ) พลังงานที่ให้สารตัวอย่างมีค่าสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปี (Enthalpy) ของสารตัวอย่าง เมื่อสารตัวอย่างดูดพลังงาน เรียกว่า เอนทัลปีมีการเปลี่ยนแปลงแบบดูดพลังงาน (Endothermic) และเมื่อสารตัวอย่างคายพลังงาน เรียกว่า เอนทัลปีมีการเปลี่ยนแปลงแบบคายพลังงาน (Exothermic)



รูปที่ ค.1 หลักการทำงานของเครื่องมือวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของสาร

การทดสอบสารตัวอย่าง จะทำโดยการเพิ่มหรือลดอุณหภูมิสารตัวอย่างด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิที่คงที่ หรือการรักษาอุณหภูมิของสารตัวอย่างไว้คงที่ (Isothermal) เป็นระยะเวลาหนึ่ง และสำหรับการทดสอบส่วนใหญ่ บรรยากาศจะมีบทบาทสำคัญต่อผลการทดสอบเช่นเดียวกับอุณหภูมิและอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ ซึ่งส่วนใหญ่แล้วบรรยากาศที่ใช้ในการทดสอบมีสองแบบ คือ บรรยากาศเฉื่อย (Inert atmosphere) เช่น แก๊สไนโตรเจน เป็นต้น และบรรยากาศที่มีแก๊สออกซิเจน (Oxidizing atmosphere) ได้แก่ แก๊สออกซิเจน และอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้