

ถ้ำแกลบและซิลิกาที่สกัดจากถ้ำแกลบเพื่อปรับปรุงค่าการนำความร้อนของพาราฟิน
ที่ใช้เป็นสารกักเก็บพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

ถ้าเกลบและชิลิกาที่สกัดจากถ้าเกลบเพื่อปรับปรุงค่าการนำความร้อนของพาราฟิน
ที่ใช้เป็นสารกักเก็บพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์



ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

RICE HUSK ASH AND EXTRACTED SILICA FROM RICE HUSK ASH TO
ENHANCE THERMAL CONDUCTIVITY OF PARAFFIN USED AS
SOLAR THERMAL 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 2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง เก้าแกลบและซิลิกาที่สกัดจากเก้าแกลบเพื่อปรับปรุงค่าการนำความร้อน
ของพาราฟินที่ใช้เป็นสารกักเก็บพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์
โดย นางสาวอัจฉรีย์พรรณ สนิทไทย
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร. วลัยรัตน์ จันทระอัมพร
 สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปริญญานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญานิพนธ์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Project Title	Rice Husk Ash and Extracted Silica from Rice Husk Ash to Enhance Thermal Conductivity of Paraffin Used as Solar Thermal Energy Storage
By	Miss Atchareepan Sanitthai
Degree	Bachelor of Engineering
Program	Chemical Engineering
Year	2016
Advisor	Assist.Prof.Dr. Walairat Chandra-ambhom

Abstract

Paraffin is a phase change material (PCM) that is widely used in thermal energy storage (TES) system since it has high heat of fusion. However one problem of using paraffin as an energy storage is its low thermal conductivity. This research aims to evaluate the possibility of bringing rice husk ash and extracted silica from rice husk ash to enhance thermal conductivity of paraffin by adding 5 percent by weight of rice husk ash and extracted silica from rice husk ash into the paraffin. Then their thermal conductivities are measured by a hot disk thermal constant analyzer and their melting temperatures and heats of fusion are measured by a differential scan calorimeter (DSC). Adding rice husk ash and silica into paraffin decreased thermal conductivity of paraffin by 18.95% and 17.06%, respectively. The obtained results are used to design a solar water heating system by the prepared energy storage materials, the system consist a paraffin tank inside water tank. Based on calculations to estimate water temperatures in water tank during period of a day compare with water tank without paraffin tank. Calculations result using water tank with paraffin tank helps to decrease cooling rate of water during the day.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จเรียบร้อยได้ด้วยความอนุเคราะห์และความช่วยเหลือดูแลเอาใจใส่เป็นอย่างดีจากบุคคลหลายท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ผศ.ดร. วลัยรัตน์ จันทระอมพร อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์ ซึ่งท่านได้ให้ความรู้ คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการดำเนินงานวิจัยให้ลุล่วง อีกทั้งยังช่วยแก้ปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้นระหว่างการดำเนินงานวิจัย นอกจากนี้ท่านยังได้ให้ข้อคิด ประสบการณ์ต่างๆ และคำแนะนำในการแก้ไขปัญหาทุกอย่างที่เกิดขึ้นอย่างรอบคอบ ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ในการทำงานในฐานะวิศวกรเคมี และตรวจสอบแก้ไขปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความถูกต้องเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ดร.ณัฐพล ฤกษ์เกษมสันต์ และ ดร.อมตะ อนันต์พินิจวัฒนา กรรมการสอบปริญญานิพนธ์ที่ได้กรุณาให้ข้อเสนอแนะเพิ่มเติม และแนวคิดที่เป็นประโยชน์ต่อการดำเนินงานวิจัย ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. ประกอบ กิจไชยา ที่ให้ความอนุเคราะห์เฝ้าสังเกตในงานวิจัย ขอขอบพระคุณคณาจารย์และเจ้าหน้าที่ทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สำหรับความช่วยเหลือและคำแนะนำในการดำเนินงานวิจัย

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดามารดา และครอบครัว ซึ่งเปิดโอกาสให้ได้รับการศึกษาเล่าเรียน เป็นกำลังใจสำคัญอย่างยิ่งที่ช่วยผลักดันทำให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จเรียบร้อยได้ด้วยดี คุณงามความดีและคุณประโยชน์อันใดที่เกิดขึ้นจากปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่านที่ได้กล่าวมาข้างต้น หากมีข้อผิดพลาดประการใด ผู้วิจัยขอน้อมรับและขออภัยมา ณ ที่นี้ด้วย

อัจฉรีย์พรรณ สนิทไทย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูปภาพ.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนและการดำเนินงานวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 แก๊สแลบและซิลิกา.....	3
2.1.1 แก๊สแลบ.....	3
2.1.2 ซิลิกา.....	4
2.2 วัสดุเปลี่ยนสถานะ (phase change materials หรือ PCM).....	5
2.2.1 สารประกอบอินทรีย์ (organic compound).....	6
2.2.2 สารประกอบอนินทรีย์ (inorganic compound).....	9
2.2.3 สารยูเทกติก (eutectic compound).....	9
2.3 ค่าสภาพการนำความร้อนของวัสดุ (thermal conductivity).....	10
2.4 ระบบทำน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์.....	11
2.4.1 ประเภทของระบบทำน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์.....	11
2.4.2 ประเภทของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (solar collector).....	11
2.4.3 การถ่ายความร้อนภายในระบบทำน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์.....	12
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	13
2.5.1 การปรับปรุงค่าสภาพการนำความร้อนของพาราฟิน.....	13
2.5.2 การสกัดซิลิกาจากแก๊สแลบ.....	14
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการ.....	15
3.1 สารเคมี และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	15
3.1.1 สารเคมี.....	15
3.1.2 อุปกรณ์ และเครื่องมือ.....	15

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2 วิธีการทดลอง	16
3.2.1 เตรียมแก้วแกลบที่ใช้เติมลงในพาราฟิน.....	16
3.2.2 เตรียมซิลิกาจากแก้วแกลบ เพื่อใช้เติมลงในพาราฟิน	16
3.2.2.1 ขั้นตอนการล้างด้วยกรด (acid washing)	16
3.2.2.2 ขั้นตอนการสกัดซิลิกา (silica extraction).....	16
3.2.2.3 ขั้นตอนการทำซิลิกาให้บริสุทธิ์ (purified silica).....	18
3.2.3 เติมน้ำที่ได้จากการเตรียมในข้อ 3.2.1 และข้อ 3.2.2 ลงใน	18
3.2.4 ตรวจสอบค่าคุณสมบัติทางความร้อนของวัสดุ	20
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง	21
4.1 ผลการวิเคราะห์ค่าสภาพการนำความร้อนของวัสดุที่เก็บความร้อน.....	21
4.2 ผลการวิเคราะห์จุดหลอมเหลวและความร้อนแฝงการหลอมเหลวของวัสดุที่เก็บความ ร้อน.....	23
4.3 การออกแบบระบบทำน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์.....	24
4.3.1 ระบบทำน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์.....	24
4.3.2 การคำนวณอุณหภูมิในถังเก็บ ณ ช่วงเวลาต่างๆ ภายใน 1 วัน.....	26
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	29
5.1 สรุปผลการวิจัย	29
5.2 ข้อเสนอแนะ	29
เอกสารอ้างอิง.....	30
ภาคผนวก	34
ภาคผนวก ก ข้อมูลดิบ	35
ภาคผนวก ข วิธีการคำนวณเกี่ยวกับการออกแบบระบบทำน้ำร้อนจากพลังงาน แสงอาทิตย์	36
ภาคผนวก ค ข้อมูลการวิเคราะห์ผล.....	44
ภาคผนวก ง เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	49

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างการใช้ประโยชน์จากถ้ำเกลือ.....	3
ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบของถ้ำเกลือ.....	4
ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติของซลิกา.....	4
ตารางที่ 2.4 ค่าคุณสมบัติต่างๆของสารประกอบพาราฟิน.....	7
ตารางที่ 2.5 คุณสมบัติของวัสดุเมื่อมีการใส่วัสดุขนาดนาโนเมตรลงในพาราฟิน.....	8
ตารางที่ 4.1 ค่าสภาพการนำความร้อนของวัสดุที่กักเก็บความร้อน.....	21
ตารางที่ 4.2 จุดหลอมเหลวและค่าความร้อนแฝงการหลอมเหลวของวัสดุที่กักเก็บความร้อน.....	23
ตารางที่ 4.3 ข้อมูลการออกแบบระบบทำน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์.....	25
ตารางที่ 4.4 ผลการคำนวณอุณหภูมิในถังเก็บ ณ ช่วงเวลาต่างๆ ภายใน 1 วัน เปรียบเทียบระหว่างถังเก็บน้ำที่ไม่มีถึงบรรจุพาราฟิน และถังเก็บน้ำที่มีถึงบรรจุพาราฟิน.....	26
ตารางที่ ก.1 ข้อมูลการทดลองสกัดซลิกาจากถ้ำเกลือ.....	35
ตารางที่ ข.1 ข้อมูลเกี่ยวกับความเข้มข้นสีของแสงอาทิตย์อุณหภูมิก๊าซที่ใช้ในการคำนวณ.....	36
ตารางที่ ข.2 ผลการคำนวณในถังเก็บน้ำที่ไม่มีถึงบรรจุพาราฟิน.....	38
ตารางที่ ข.3 ผลการคำนวณในถังเก็บน้ำที่มีถึงบรรจุพาราฟิน.....	39
ตารางที่ ค.1 ผลการวิเคราะห์วัสดุที่กักเก็บความร้อนด้วยเทคนิค TGA.....	44
ตารางที่ ค.2 ผลการวิเคราะห์ชนิดและปริมาณสารประกอบในถ้ำเกลือ.....	46
ตารางที่ ค.3 ผลการวิเคราะห์ชนิดและปริมาณสารประกอบในซลิกา.....	47

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.1 เถ้าแกลบ.....	3
รูปที่ 2.2 การแบ่งประเภทของวัสดุเปลี่ยนเฟส (phase change materials หรือ PCM).....	6
รูปที่ 2.3 พาราฟินแร็ทซ์.....	6
รูปที่ 2.4 การถ่ายความร้อนภายในระบบทำน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์.....	12
รูปที่ 3.1 (ก) กวนสารผสมเถ้าแกลบด้วยเครื่องกวน.....	16
รูปที่ 3.1 (ข) กรองสารที่ผ่านการกวนผสม.....	16
รูปที่ 3.2 ให้ความร้อนและกวนสารผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องกวน.....	16
รูปที่ 3.3 (ก) กรองสารที่ผ่านการกวนผสม.....	17
รูปที่ 3.3 (ข) สารที่ได้จากการกรอง.....	17
รูปที่ 3.4 ลักษณะเจลที่เกิดขึ้น.....	17
รูปที่ 3.5 (ก) ซิลิกา.....	18
รูปที่ 3.5 (ข) ซิลิกาที่ผ่านการบด.....	18
รูปที่ 3.6 การเติมเถ้าแกลบและซิลิกาที่สกัดได้จากเถ้าแกลบลงในพาราฟิน.....	18
รูปที่ 3.7 การผสมเถ้าแกลบกับพาราฟินและการผสมซิลิกากับพาราฟิน.....	19
รูปที่ 3.8 การผสมเถ้าแกลบกับพาราฟินและการผสมซิลิกากับพาราฟินโดยใช้เครื่องล้างความถี่สูง..	19
รูปที่ 3.9 พาราฟินที่ผ่านการเติมเถ้าแกลบ.....	20
รูปที่ 3.10 พาราฟินที่ผ่านการเติมซิลิกาที่สกัดได้จากเถ้าแกลบ.....	20
รูปที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของของเถ้าแกลบ.....	21
รูปที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของซิลิกาที่สกัดได้จากเถ้าแกลบ.....	22
รูปที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC ของวัสดุที่เก็บความร้อน.....	23
รูปที่ 4.4 การออกแบบระบบทำน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์.....	24
รูปที่ 4.5 อุณหภูมิของระบบทำน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ในช่วงเวลา 1 วัน.....	27
รูปที่ ค.1 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC ของพาราฟิน.....	45
รูปที่ ค.2 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC ของพาราฟินที่ผ่านการเติมเถ้าแกลบ.....	45
รูปที่ ค.3 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC ของพาราฟินที่ผ่านการเติมซิลิกา.....	46
รูปที่ ค.4 ผลการวิเคราะห์ชนิดและปริมาณสารประกอบในเถ้าแกลบ.....	47
รูปที่ ค.5 ผลการวิเคราะห์ชนิดและปริมาณสารประกอบในซิลิกา.....	48
รูปที่ ง.1 เครื่อง XRD.....	49
รูปที่ ง.2 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ในผลึก.....	50
รูปที่ ง.3 เครื่อง XRF.....	51

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ ง.4 หลักการทำงานของ XRF	52
รูปที่ ง.5 เครื่อง DSC	53
รูปที่ ง.6 หลักการของเครื่อง DSC	54
รูปที่ ง.7 เครื่อง Hot Disk TCA	55
รูปที่ ง.8 การทำงานเครื่อง Hot Disk TCA.....	55



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมาได้มีการศึกษาและทำการวิจัยเกี่ยวกับระบบกักเก็บพลังงานความร้อน (thermal energy storage) ซึ่งมีความสำคัญอย่างมากกับการนำไปประยุกต์ใช้ในงานวิศวกรรมต่างๆ [1] อุตสาหกรรมหลายชนิดมีความเกี่ยวข้องกับกระบวนการการถ่ายเทความร้อน ซึ่งเป็นอีกหนึ่งกระบวนการที่มีความสำคัญและก่อให้เกิดค่าใช้จ่ายที่สูง ส่งผลทำให้ราคาของผลิตภัณฑ์สูงตามไปด้วย จึงได้มีการศึกษาเกี่ยวกับระบบกักเก็บพลังงานความร้อน ซึ่งเป็นการกักเก็บความร้อนส่วนเกินจากแหล่งที่ผลิตได้ หรือจากแหล่งพลังงานรูปแบบอื่น แล้วนำมาใช้ประโยชน์เมื่อมีความจำเป็น โดยรูปแบบเทคโนโลยีของระบบการเก็บสะสมพลังงานความร้อนมีอยู่หลากหลายรูปแบบ ขึ้นอยู่กับแหล่งพลังงานตั้งต้นและการนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ ซึ่งเทคโนโลยีวัสดุกักเก็บพลังงานความร้อนประเภทสารเปลี่ยนสถานะ (phase change material หรือ PCM) ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในปัจจุบัน โดยวัสดุที่กักเก็บพลังงานความร้อนชนิดนี้จะทำงานระหว่างสองสถานะ คือ ของแข็งและของเหลว โดยดูดซับและคายความร้อนในลักษณะความร้อนแฝง (latent heat) และสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ สารประกอบอินทรีย์ (organic compound) เช่น พาราฟิน (paraffin) สารประกอบอนินทรีย์ (inorganic compound) เช่น salt-hydrate และสารยูเทกติก (eutectic compound) จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าพาราฟินมีความเหมาะสมมากกว่าเกลือ เนื่องจากเกลืออาจมีการแยกตัวหลังจากมีการเปลี่ยนสถานะไประยะหนึ่งแล้ว พาราฟินจึงถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวาง นอกจากนี้อีกหนึ่งเหตุผลที่มีการนำพาราฟินมาใช้ คือ พาราฟินเป็นสารกลุ่มแอลเคนไฮโดรคาร์บอน (alkane hydrocarbon) ที่มีอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะขึ้นอยู่กับความยาวของสายโซ่คาร์บอน (carbon chain) ในโมเลกุล ดังนั้นผู้ผลิตจึงสามารถควบคุมให้มีอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะที่หลากหลายเพื่อให้มีความเหมาะสมกับการใช้งานในแต่ละประเภทได้ [2] การเลือกใช้วัสดุกักเก็บความร้อนต้องมีคุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพที่เหมาะสมกับงานที่ใช้ เช่น คุณสมบัติในการเก็บสะสมปริมาณความร้อนที่เหมาะสม มีช่วงอุณหภูมิของการหลอมเหลวที่เหมาะสมกับงานที่จะนำไปใช้ ไม่มีความเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมและระบบการทำงาน สามารถนำไปใช้งานได้ง่าย และสามารถเปลี่ยนสถานะได้โดยไม่มีการเสื่อมสภาพ เมื่อมีการใช้งานเป็นเวลานาน [3]

ประเทศไทยเป็นประเทศผู้ส่งออกข้าวรายใหญ่ของโลก ข้าวเปลือกที่เก็บเกี่ยวได้เมื่อนำมาผ่านกระบวนการสีจะได้เมล็ดข้าวกับเปลือกข้าวหรือแกลบ โดยแกลบจะมีน้ำหนักประมาณร้อยละ 22.5-25.2 ของข้าวเปลือก และการใช้ประโยชน์จากแกลบวิธีหนึ่งคือ การใช้เป็นเชื้อเพลิง เพราะแกลบมีค่าความร้อนเฉลี่ย 3880 กิโลแคลอรี/กิโลกรัม โดยแกลบจะให้เชื้อออกมาประมาณร้อยละ 17.4 ของปริมาณแกลบที่นำมาเผา ลักษณะของแกลบ คือ มีความพรุนมาก น้ำหนักเบา มีพื้นที่ผิวมาก มีสมบัติดูดซับที่ดี การใช้ประโยชน์จากแกลบสามารถนำไปใช้ได้หลากหลาย เนื่องจากแกลบมีราคาถูกและหาง่าย [4] องค์ประกอบหลักของแกลบ คือ ซิลิกา ซึ่งสามารถนำมาปรับปรุงความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของวัสดุเปลี่ยนสถานะได้โดยการผสมในปริมาณที่เหมาะสม ซึ่งจะช่วยให้การถ่ายเทความร้อนในระบบกักเก็บความร้อนทำได้ดียิ่งขึ้น [5-6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งานวิจัยที่จะนำเสนอในที่นี้จะศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการนำเก้าอี้กลับมาปรับปรุง สมบัติการถ่ายเทความร้อนของพาราฟิน ซึ่งเป็นวัสดุเก็บพลังงานความร้อนประเภทเปลี่ยนสถานะ โดยตรวจสอบค่าสภาพการนำความร้อน ค่าความจุความร้อนจำเพาะ อุณหภูมิการหลอมเหลวของ และความร้อนแฝงการหลอมเหลวของวัสดุ

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ คือ ศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการนำเก้าอี้กลับมาปรับปรุง สมบัติการถ่ายเทความร้อนของพาราฟิน ซึ่งเป็นวัสดุเก็บพลังงานความร้อนประเภทเปลี่ยนสถานะ โดยตรวจสอบค่าสภาพการนำความร้อน ค่าความจุความร้อนจำเพาะ อุณหภูมิการหลอมเหลวของ และความร้อนแฝงการหลอมเหลวของวัสดุ เพื่อเป็นแนวทางสำหรับประยุกต์ใช้เป็นวัสดุกักเก็บความร้อนที่มีประสิทธิภาพต่อไป

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาสมบัติการถ่ายเทความร้อนของพาราฟิน
2. ศึกษาสมบัติการถ่ายเทความร้อนของพาราฟินที่เติมเก้าอี้ และพาราฟินที่เติมซิลิกาที่เตรียมจากเก้าอี้
3. ประเมินความเป็นไปได้ของการนำวัสดุกักเก็บความร้อนที่เตรียมได้ในข้อ 2 มาใช้ในการกักเก็บพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์

1.4 ขั้นตอนและการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาและค้นคว้าข้อมูลเกี่ยวกับทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. ออกแบบการทดลอง จัดเตรียมอุปกรณ์ เครื่องมือ และสารเคมีในการทดลอง
3. ทดลองโดยการเติมเก้าอี้ เก้าอี้ที่ผ่านการเผาเพื่อกำจัดคาร์บอนส่วนเกิน และซิลิกาที่เตรียมจากเก้าอี้ลงในพาราฟิน จากนั้นนำวัสดุกักเก็บความร้อนไปตรวจวัดหาค่าสภาพการนำความร้อนของวัสดุ อุณหภูมิการหลอมเหลวของวัสดุ ปริมาณพลังงานที่ใช้ในการหลอมเหลว และค่าความจุความร้อนจำเพาะของวัสดุ
4. ออกแบบระบบทำน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์
5. สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถนำวัสดุที่เหลือใช้ทางการเกษตรมาประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์ และเป็นการลดปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นอีกด้วย
2. ทราบถึงแนวโน้มของสมบัติการถ่ายเทความร้อนของพาราฟินที่เติมเก้าอี้ และพาราฟินที่เติมซิลิกาที่เตรียมจากเก้าอี้
3. สามารถประเมินความเป็นไปได้ของการนำวัสดุกักเก็บความร้อนที่เตรียมได้ในข้อ 2 มาใช้ในการกักเก็บพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ถ้ำแกลบและชิลิกา

2.1.1 ถ้ำแกลบ



รูปที่ 2.1 ถ้ำแกลบ [4]

แกลบ (rice husk) คือ เปลือกแข็งของเมล็ดข้าวที่ได้จากการสีข้าว เป็นส่วนที่เหลือใช้จากการผลิตข้าวสาร ประกอบด้วยเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน คุณสมบัติของแกลบ คือ ไม่ละลายในน้ำ มีความคงตัวทางเคมี ทนทานต่อแรงกระทำ จึงทำให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างการใช้ประโยชน์จากถ้ำแกลบ [4]

ประเภทในการนำไปใช้ประโยชน์	ประโยชน์ที่นำไปใช้
อุตสาหกรรมโลหะ	โรยถ้ำแกลบบนผิวหน้าแอ่งรับน้ำโลหะ เพื่อป้องกันการเย็นตัวอย่างรวดเร็วของเหล็กและเพื่อให้เหล็กแข็งตัวอย่างสม่ำเสมอ
อุตสาหกรรมซีเมนต์และคอนกรีต	เป็นส่วนผสมในการผลิตคอนกรีตความแข็งแรงสูง
อุตสาหกรรมการผลิตอิฐทนไฟ	เป็นส่วนผสมในการผลิตอิฐทนไฟ หรืออิฐทนความร้อนสูง
สารปรับปรุงดิน	สามารถปรับสภาพดินให้มีความเป็นกรดลดลง

อีกหนึ่งการนำไปใช้ประโยชน์ที่ได้รับความนิยม คือ นำแกลบไปใช้เป็นเชื้อเพลิง เนื่องจากแกลบมีค่าความร้อนเฉลี่ย 3880 กิโลแคลอรี/กิโลกรัม ขณะที่ค่าความร้อนของไม้พืนมีค่า 4475 กิโลแคลอรี/กิโลกรัมซึ่งไม่แตกต่างกันมากนัก [4] การนำแกลบมาเผาจะได้ถ้ำแกลบประมาณ 16.4-18.3 ร้อยละโดยน้ำหนัก องค์ประกอบทางเคมีของถ้ำแกลบ ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบของแก้วเคลือบ [7]

องค์ประกอบทางเคมี	ร้อยละโดยมวล
SiO ₂	95.35
Al ₂ O ₃	0.93
Fe ₂ O ₃	0.83
CaO	0.50
MgO	0.45
K ₂ O	1.5
SiO ₃	0.28

2.1.2 ซิลิกา

ซิลิกา (SiO₂) สามารถเกิดขึ้นได้ทั้งจากธรรมชาติและการสังเคราะห์ขึ้น โดยซิลิกาจะปรากฏอยู่ในสถานะรูปผลึก และมีอยู่ในรูปของควอตซ์ ทั้งนี้รูปร่างทางกายภาพของซิลิกาแบ่งได้เป็นสามแบบ คือ ผลึก (crystalline) ออสัญฐาน (amorphous) และอสัญฐานสังเคราะห์ (synthetic amorphous) [8] จากตารางที่ 2.2 พบว่าซิลิกามีสัดส่วนมากที่สุดในองค์ประกอบทั้งหมดในแก้วเคลือบ แต่ไม่ใช่ซิลิกาที่มีความบริสุทธิ์ เนื่องจากในแก้วเคลือบมีสารอื่นปนอยู่ด้วย จึงได้มีหลายงานวิจัยที่นำเสนอวิธีการในการทำให้ซิลิกาที่มีความบริสุทธิ์มากยิ่งขึ้น เพื่อให้ซิลิกาบริสุทธิ์ที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป ซึ่งคุณสมบัติของซิลิกาแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติของซิลิกา [8]

สูตรโมเลกุล	SiO ₂
น้ำหนักโมเลกุล	60.08 กรัม/โมล
สถานะ	ของแข็งสีขาว ไม่มีกลิ่น
ความถ่วงจำเพาะ	2.2-2.6
จุดหลอมเหลว	1713 องศาเซลเซียส
จุดเดือด	มากกว่า 2200 องศาเซลเซียส
การละลาย	<ul style="list-style-type: none"> - ไม่ละลายน้ำหรือละลายได้น้อย - ไม่ละลายในกรดทุกชนิด ยกเว้นกรดไฮโดรฟลูออริก - ละลายได้โดยการหลอมกับด่าง
การติดไฟ	ไม่ติดไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 วัสดุเปลี่ยนสถานะ (phase change materials หรือ PCM)

ระบบกักเก็บพลังงานความร้อนมีทั้งหมด 3 ระบบ ได้แก่ ระบบกักเก็บพลังงานความร้อนสัมผัส (sensible heat storage หรือ SHS) ระบบกักเก็บพลังงานความร้อนโดยใช้ปฏิกิริยาเคมีของสารชนิดต่างๆ (thermochemical heat storage) และระบบกักเก็บพลังงานความร้อนแฝง (latent heat storage หรือ LHS) [1] ซึ่งเป็นระบบที่เกี่ยวข้องกับวัสดุเปลี่ยนสถานะ เพราะถือได้ว่าวัสดุเปลี่ยนสถานะเป็นวัสดุที่ใช้เก็บสะสมพลังงานความร้อนของระบบกักเก็บพลังงานความร้อนแฝง ซึ่งเป็นระบบที่อาศัยหลักการของการดูดและการคายพลังงานความร้อน เมื่อวัสดุที่นำมาใช้ในระบบกักเก็บความร้อนแฝงมีการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งไปเป็นของเหลว หรือของเหลวไปเป็นแข็ง เมื่อมีตัวกลางเป็นวัสดุเปลี่ยนสถานะ (phase change material หรือ PCM) ความสามารถในการเก็บพลังงานความร้อนของระบบกักเก็บพลังงานความร้อน สามารถคำนวณได้ดังสมการต่อไปนี้ [9]

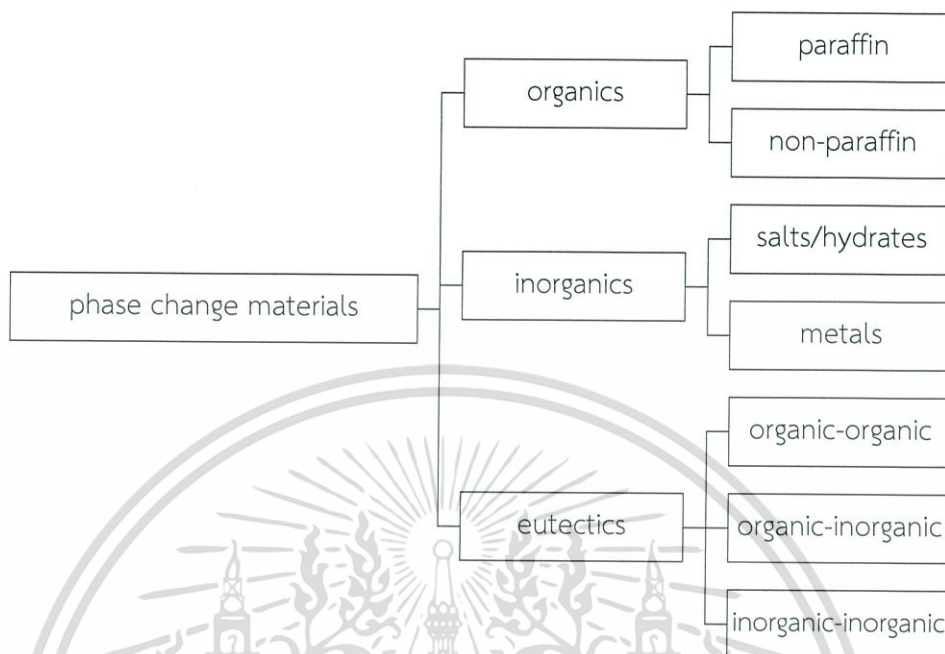
$$Q = \int_{T_i}^{T_m} m C_p dT + m a_m \Delta h_m + \int_{T_m}^{T_f} m C_p dT \quad (2.1)$$

$$Q = m [C_{sp} (T_m - T_i) + a_m \Delta h_m + C_{lp} (T_f - T_m)] \quad (2.2)$$

โดย

Q	คือ	ปริมาณความร้อนที่ถูกเก็บไว้	(J)
m	คือ	มวลของตัวกลางที่ใช้เป็นวัสดุเก็บความร้อน	(kg)
a_m	คือ	สัดส่วนที่มีการหลอมเหลว (fraction melted)	
Δh_m	คือ	ความร้อนแฝงการหลอมเหลว (heat of fusion)	(J/kg)
C_p	คือ	ความจุความร้อนจำเพาะ (specific heat)	(J/kg K)
C_{sp}	คือ	ความจุความร้อนจำเพาะระหว่าง T_i และ T_m	(J/kg K)
C_{lp}	คือ	ความจุความร้อนจำเพาะระหว่าง T_m และ T_f	(J/kg K)
T_i	คือ	อุณหภูมิเริ่มต้น	(°C)
T_m	คือ	อุณหภูมิการหลอมเหลว	(°C)
T_f	คือ	อุณหภูมิสุดท้าย	(°C)

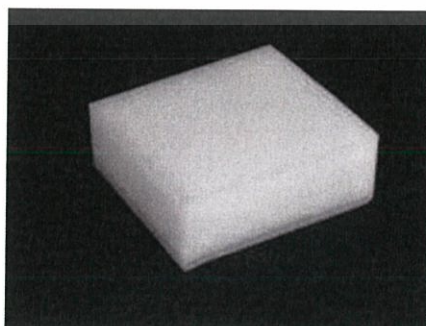
การแบ่งประเภทของวัสดุเปลี่ยนเฟส (phase change materials หรือ PCM) ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การแบ่งประเภทของวัสดุเปลี่ยนเฟส (phase change materials หรือ PCM) [1]

2.2.1 สารประกอบอินทรีย์ (organic compound)

1. พาราฟิน (paraffin) เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน มีสูตรโมเลกุล คือ C_nH_{2n+2} เป็นผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมี พาราฟินเกิดจากกระบวนการกลั่นแยกน้ำมันดิบ มีทั้งในสถานะแก๊ส ของแข็ง และของเหลว โดย C_5-C_{15} มีสถานะเป็นของเหลวที่อุณหภูมิห้อง และ C มากกว่า 15 มีสถานะเป็นของแข็ง (wax) พาราฟินเป็นสารที่มีจุดหลอมเหลวอยู่ในช่วง 23-67 องศาเซลเซียส จุดเดือดอยู่ในช่วง 150-275 องศาเซลเซียส และไม่ละลายน้ำ [3] ซึ่งพาราฟินสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้อย่างหลากหลาย ได้แก่ พาราฟินในสถานะแก๊สนำมาใช้ทำเป็นเชื้อเพลิง พาราฟินในสถานะของเหลวสามารถนำมาใช้ทำเป็นเชื้อเพลิงและยารักษาโรคได้ ส่วนพาราฟินในสถานะของแข็งสามารถนำมาใช้ทำเป็นเทียนไข สารเคลือบกระดาษ สารเคลือบเสื้อผ้า นอกจากนี้อีกอย่างหนึ่งประโยชน์ของพาราฟินที่ได้รับความนิยมอย่างมากในปัจจุบัน คือ การนำพาราฟินมาใช้เป็นวัสดุกักเก็บพลังงานความร้อน



รูปที่ 2.3 พาราฟินแว็กซ์ [10]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สาเหตุที่พาราฟินเป็นหนึ่งในสารที่ถูกใช้ในระบบเก็บพลังงานความร้อนแฝง (latent heat storage system) เป็นอย่างมาก เนื่องจากมีคุณสมบัติที่เป็นที่ต้องการสำหรับระบบกักเก็บพลังงานความร้อน ได้แก่ มีความร้อนแฝงการหลอมเหลวที่สูง ไม่ต้องพิจารณาเรื่องการเย็นตัวยิ่งยวด (super cooling) ไม่มีการกัดกร่อน และมีความเสถียรทางเคมี แต่ข้อเสียที่พบจากการใช้พาราฟินเป็นวัสดุเปลี่ยนสถานะ คือ ค่าสภาพการนำความร้อนของวัสดุ (thermal conductivity) และค่าการกักเก็บความร้อน (heat storage capacity) ต่ำ [1,6]

ตารางที่ 2.4 ค่าคุณสมบัติต่างๆของสารประกอบพาราฟิน [1]

พาราฟิน	ชนิดสารประกอบ	อุณหภูมิหลอมเหลว (°C)	ความร้อนแฝงการหลอมเหลว (kJ/kg)	C_p (kJ/(kg K))	k (W/(m K))	ρ (kg/m ³)
cooling	paraffin C14	4,5	165	-	-	-
	paraffin C15-C16	8	153	2.2 (s)	-	-
	polyglycol E400	8	99.6	-	0.187 (l,38.6°C) 0.185 (l,69.9°C)	1125 (l,25°C) 1228 (s,3°C)
	dimethyl-sulfoxide (DMS)	16.5	85.7	-	-	1009 (s/liq)
	paraffin C17-C18	20-22	152	2.2 (s)	-	-
	polyglycol E600	22	127.2	-	0.189 (l,38.6°C) 0.187 (l,67.0°C)	1126 (l,25°C) 1232 (s,4°C)
	paraffin C13-C24	22-24	189	2.1 (s)	0.21 (s)	760 (l,70°C) 900 (s,20°C)
	1-dodecanol	26	200	-	-	-
	paraffin C18	28	244	2.2(s)	0.148 (l,40°C)	774 (l,70°C)
		27.5	243.5	-	0.15 (s)	814 (s,20°C)
heating	paraffin C20-C33	48-50	189	-	2.1 (s)	769 (l,70°C) 912 (s,20°C)
	paraffin C22-C45	58-60	189	2.4 (s)	2.1 (s)	795 (l,70°C)
	paraffin wax	64	173.6 266	-	0.167 (l,63.5°C) 0.346 (s,33.6°C)	790 (l,65°C) 916 (s,24°C)
	polyglycol E6000	66	190	-	-	1085 (l,70°C) 1212 (s,25°C)
	paraffin C21-C50	66-68	189	-	2.1 (s)	830 (l,70°C) 930 (s,20°C)
	1-tetradecanol	38	205	-	-	-
	paraffin C16-C28	48-50	189	-	2.1 (s)	765 (l,70°C) 910 (s,20°C)
	biphenyl propionamide	71	119.2	-	-	991 (l,73°C) 1166 (s,24°C)
	paraffin C21-C50	79	168.2	-	-	-
	Naphthalene	80	147.7	2.8 (s)	0.132 (l,83.8°C) 0.341(s,49.9°C) 0.310 (s,66.6°C)	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากหลายงานวิจัยพบว่า การเติมสารที่มีค่าสภาพการนำความร้อนสูงลงไปในพาราฟิน จะช่วยในการปรับปรุงค่าสภาพการนำความร้อนของวัสดุให้มีค่าสูงขึ้น วัสดุนาโนที่เติมลงไป เช่น ผงเซรามิก (ceramic powder fillers) คาร์บอนนาโนไฟเบอร์ (carbon nanofibers) อนุภาคคาร์ไฟท์ (graphite particles) การไฟท์คาร์บอนไฟเบอร์ (graphite carbon particles) เป็นต้น โดยเปลี่ยนแปลงปริมาณของวัสดุนาโนที่เติมลงในพาราฟิน เพื่อเปรียบเทียบค่าสภาพการนำความร้อนที่ปริมาณต่างๆที่ได้เติมลงไป หรือสามารถนำไปเปรียบเทียบกับวัสดุนาโนชนิดอื่นได้ [6] จึงมีการรวบรวมผลของงานวิจัยเกี่ยวกับการนำวัสดุนาโนเติมลงในพาราฟินชนิดต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 คุณสมบัติของวัสดุเมื่อมีการใส่วัสดุนาโนเมตรลงในพาราฟิน [6]

ชนิดของพาราฟิน	k (W/(m K))	อุณหภูมิหลอมเหลว (°C)	วัสดุนาโน			K (W/(m K))
			ชนิด	ขนาด	ปริมาณ	
n-decosane	0.28	53-57	graphite nanoplatelets	15 μm	1 wt%	0.36
n-decosane	0.21	53.5	Al NP	80 μm	0.5 mass frac.	60%
n-decosane	0.22	42-44	expanded graphite	270 μm	2 wt%	0.40
					4 wt%	0.52
					7 wt%	0.68
					10 wt%	0.82
Paraffin	0.24	67	carbon nano fibers	100 μm	4 wt%	0.33
Paraffin	0.21	46-48	Fe_3O_4 NP	-	10 wt%	48%
					20 wt%	60%
Paraffin	0.24	28	Al_2O_3 NP	-	5 wt%	0.278
					16 wt%	0.310
Paraffin	0.22	80	Si_3N_4 NP	-	10 wt%	47%
n-octadecane	0.37	27.5	mesoporous SiO_2 NP	-	5 wt%	6%
Paraffin	0.24	-	CuO NP	40 μm	2 wt%	6%
					5 wt%	6.7%
					10 wt%	7.8%
Paraffin	0.22	55.28	Fe_3O_4 NP	10 μm	6.6 wt%	45.45%

2. สารที่ไม่ใช่พาราฟิน (non-paraffin) เป็นสารประกอบประเภทกรดไขมัน (fatty acids) เอสเทอร์ (ester) และแอลกอฮอล์ (alcohol) ข้อเสียของสารประเภทนี้ คือ เป็นสารที่ติดไฟได้ง่าย (flammable) ทำให้ไม่สามารถอยู่ในสภาวะที่มีอุณหภูมิสูง สภาวะที่ทำให้เกิดการลุกไหม้ หรือมีการทำปฏิกิริยากับตัวออกซิไดส์ (oxidizing agent) ได้ ส่วนคุณลักษณะอื่นที่สามารถพบได้ในสารประเภทนี้ คือ สามารถนำกลับมาหลอมเหลวและทำให้แข็งตัวใหม่ได้ สามารถทำให้แข็งตัวโดยไม่มี การเย็นตัวยิ่งยวด มีค่าสภาพการนำความร้อนต่ำ และมีระดับความเป็นพิษที่หลายระดับ ตั้งแต่เป็นพิษในระดับต่ำไปถึงระดับสูง ในประเภทของสารที่ไม่ใช่พาราฟิน สารประกอบประเภทกรดไขมันเป็นสารที่ได้รับความนิยมมากที่สุด เนื่องจากมีราคาถูก แต่ยังมีราคาแพงกว่าพาราฟินอยู่ประมาณ 2-2.5 เท่า [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 สารประกอบอนินทรีย์ (inorganic compound) [9]

1. เกลือไฮเดรต (salt hydrate) ถือได้ว่าเป็นโลหะผสมของเกลืออนินทรีย์ (AB) และน้ำ (H_2O) กลายเป็นผลึกของแข็ง ที่มีสูตรทั่วไป คือ $AB \cdot nH_2O$ โดยกระบวนการเปลี่ยนแปลงสถานะระหว่างของแข็งกับของเหลวของเกลือไฮเดรตจะเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาการดึงน้ำออกจากโมเลกุล (dehydration) หรือปฏิกิริยาการเติมน้ำเข้าไปในโมเลกุล (hydration) ข้อเสียของเกลือไฮเดรต คือ เกลือไฮเดรตเป็นสารที่มีน้ำอยู่ในโมเลกุล ทำให้เกิดความไม่เสถียรทางเคมี เมื่อได้รับความร้อนจะทำให้สมรรถนะลดลง เนื่องจากสูญเสียน้ำออกจากโมเลกุล และมีความว่องไวต่อการทำปฏิกิริยาอีกด้วย ส่วนข้อดีของเกลือไฮเดรต คือ สามารถหาได้ง่าย ราคาถูก มีช่วงของจุดหลอมเหลวชัดเจน ค่าสภาพการนำความร้อนค่อนข้างสูง ซึ่งช่วยให้การกระจายตัวหรือการถ่ายเทความร้อนในระบบกักเก็บความร้อนทำได้ดียิ่งขึ้น และมีค่าความร้อนแฝงการหลอมเหลวที่สูง ซึ่งช่วยให้ใช้สารในปริมาณที่น้อยลงได้ในการนำมาใช้งาน และเมื่อเกลือไฮเดรตมีอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะมีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรเพียงเล็กน้อย ทำให้ง่ายต่อการออกแบบภาชนะจัดเก็บในระบบกักเก็บความร้อนอีกด้วย

2. โลหะ (metals) สารประเภทนี้จะรวมถึงโลหะที่มีจุดหลอมเหลวต่ำและโลหะยูเทกติกด้วย โลหะไม่ค่อยได้รับความนิยมในการนำมาใช้เป็นวัสดุเปลี่ยนเฟส เนื่องจากปัญหาเรื่องน้ำหนัก แต่เมื่อพิจารณาในแง่ของปริมาตร โลหะก็อาจจัดได้ว่าเป็นตัวเลือกที่เหมาะสม เนื่องจากมีความร้อนแฝงการหลอมเหลวต่อหน่วยปริมาตรค่อนข้างสูง นอกจากนี้โลหะยังเป็นสารที่มีค่าสภาพการนำความร้อนค่อนข้างสูงอีกด้วย แต่การจะนำโลหะไปเติมลงในสารอื่นเพื่อเพิ่มความสามารถด้านการนำความร้อนจะไม่เหมาะสมกับการนำไปใช้งาน เนื่องจากจะทำให้วัสดุเปลี่ยนเฟสที่นำไปใช้งานมีน้ำหนักมาก ข้อดีของโลหะ คือ มีค่าสภาพการนำความร้อนที่สูง ความร้อนแฝงการหลอมเหลวต่อหน่วยปริมาตรค่อนข้างสูง ความร้อนจำเพาะและความดันไอที่ค่อนข้างต่ำ

2.2.3 สารยูเทกติก (eutectic compound) [1]

สารประกอบยูเทกติกเป็นสารเกิดจากการนำสารประกอบอนินทรีย์หรือสารประกอบอนินทรีย์มาผสมกันตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ได้สารที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ โดยจุดหลอมเหลวของสารจะต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของแต่ละสารประกอบที่นำมาผสม ข้อดีของสารประกอบยูเทกติก คือ การหลอมเหลวและการแข็งตัวจะไม่ทำให้เกิดการแยกตัวของสาร ประเภทของสารประกอบยูเทกติกจะแบ่งตามชนิดของสารประกอบที่นำมาผสมกัน ดังนี้

1. สารประกอบอนินทรีย์กับสารประกอบอนินทรีย์ โดยทั่วไปแล้วจะมีจุดหลอมเหลวต่ำและมีความร้อนแฝงการหลอมเหลวสูงมากกว่าประเภทอื่น นิยมนำไปประยุกต์ใช้เกี่ยวกับการก่อสร้าง
2. สารประกอบอนินทรีย์กับสารประกอบอนินทรีย์
3. สารประกอบอนินทรีย์กับสารประกอบอนินทรีย์

2.3 ค่าสภาพการนำความร้อนของวัสดุ (thermal conductivity)

เมื่อพิจารณาค่าอุณหภูมิที่ถ่ายเทจากด้านในของวัตถุหนึ่งสู่ด้านนอก กรณีนี้แสดงว่ามีการถ่ายเทพลังงานความร้อนจากขอบเขตที่มีอุณหภูมิสูงไปสู่ขอบเขตที่มีอุณหภูมิต่ำ ลักษณะนี้เรียกว่าพลังงานความร้อนถ่ายเทด้วยวิธีการนำ การนำความร้อนเป็นปรากฏการณ์ระดับอนุภาคของสสาร เมื่อได้รับความร้อนจะเกิดการสั่นและส่งต่อพลังงานกัน การนำความร้อนจึงเกิดขึ้นได้ในสสารทุกสถานะทั้งของแข็ง ของเหลว หรือก๊าซ ซึ่งความสามารถในการนำความร้อนของสสารแต่ละชนิดจะมีค่าแตกต่างกัน พารามิเตอร์ที่ใช้อธิบายความสามารถดังกล่าวเรียกว่า ค่าสภาพการนำความร้อน (thermal conductivity, k) วัสดุที่มีค่าสภาพการนำความร้อนสูงจะนำความร้อนได้ดี เช่น เหล็ก ทองแดง อลูมิเนียม จะนิยมนำเอามาใช้ทำภาชนะหุงต้ม หรืออุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ส่วนวัสดุที่มีค่าสภาพการนำความร้อนต่ำจะนำความร้อนได้น้อย เช่น โยเกิร์ต ยิปซัม จะนิยมนำมาใช้ทำฉนวนกันความร้อน พื้นฐานการนำความร้อนอธิบายได้ด้วยกฎการนำความร้อนของโจเซฟ ฟูเรียร์ (fourier law of heat conduction) ซึ่งเป็นผู้รวบรวมนิยามสำคัญและแสดงการวิเคราะห์ปัญหาการถ่ายเทความร้อนด้วยการนำไว้ [11]

$$Q = kA_c \frac{dT}{dx} \quad (2.3)$$

โดย

Q คือ อัตราการถ่ายเทความร้อน
 k คือ ค่าสภาพการนำความร้อน
 $\frac{dT}{dx}$ คือ ค่าอุณหภูมิในทิศทางที่ความร้อนไหล

ซึ่งรูปแบบการส่งผ่านความร้อนในวัสดุตามกฎของฟูเรียร์นั้น เมื่อมองลึกลงไปด้วยมุมมองของทฤษฎีจลน์ (kinetic theory) พลังงานความร้อนจะถูกส่งผ่านของแข็งด้วยพาหะนำความร้อน (heat carrier) คือ อิเล็กตรอน (electrons) และอนุภาคควอนตัมของคลื่นที่เกิดจากการสั่นของอะตอมในโครงผลึก หรือที่เรียกว่าโฟนอน (phonons) ดังนั้น ผลรวมของสภาพการนำความร้อนจะถูกเขียนอยู่ในรูปผลบวกของสภาพการนำความร้อนจากอิเล็กตรอนและสภาพการนำความร้อนจากโฟนอน [12]

$$k = k_e + k_l \quad (2.4)$$

โดย

k_e คือ สภาพการนำความร้อนจากอิเล็กตรอน
 k_l คือ สภาพการนำความร้อนจากโฟนอน

ซึ่งโดยปกติแล้วตัวแปรใดตัวแปรหนึ่งระหว่างอิเล็กตรอนและโฟนอนจะมีอิทธิพลสูงกว่าอีกตัวแปรหนึ่งเสมอ โดยสารที่เป็นโลหะอิเล็กตรอนจะมีอิทธิพลมากกว่าโฟนอน ส่วนสารที่ไม่ใช่โลหะโฟนอนจะมีอิทธิพลมากกว่าอิเล็กตรอน

โดยรูปแบบการส่งผ่านความร้อนจากปลายด้านหนึ่งสู่ปลายด้านหนึ่งจะอาศัยอนุภาคพาหะนำความร้อนที่มีการเคลื่อนที่และมีการชนกันขึ้นบ่อยครั้งภายในวัสดุ และการชนนั้นจะสามารถทำให้เกิดการถ่ายโอนพลังงานระหว่างอนุภาคด้วย จึงอาศัยแนวคิดของระยะทางที่พาหะนำความร้อนสามารถเคลื่อนที่ได้โดยปราศจากการชน ที่เรียกว่า ระยะทางอิสระเฉลี่ย (mean free path, l) ดังนั้นค่าสภาพการนำความร้อนในมุมมองของทฤษฎีจลน์ [13] สามารถเขียนได้ดังสมการ 2.5

$$k = \frac{1}{3} C_e v_e l_e + \frac{1}{3} C_l v_l l_l \quad (2.5)$$

โดย

C_e	คือ	ความจุความร้อนต่อปริมาตรของวัสดุโดยอิเล็กตรอน
C_l	คือ	ความจุความร้อนต่อปริมาตรของวัสดุโดยโฟนอน
v_e	คือ	ความเร็วเฉลี่ยของพาหะอิเล็กตรอน
v_l	คือ	ความเร็วเฉลี่ยของพาหะโฟนอน
l_e	คือ	ระยะทางอิสระเฉลี่ยของอิเล็กตรอน
l_l	คือ	ระยะทางอิสระเฉลี่ยของโฟนอน

2.4 ระบบทำน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์

2.4.1 ประเภทของระบบทำน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ [14]

สามารถจำแนกได้เป็น 3 ประเภท ดังนี้

1. แบบไหลเวียนตามธรรมชาติ (thermo siphon system) เป็นระบบที่มีถังเก็บน้ำอยู่สูงกว่าแผงรับแสงอาทิตย์ ใช้หลักการหมุนเวียนตามธรรมชาติ เมื่อน้ำได้รับความร้อนจากแสงอาทิตย์จะมีความหนาแน่นน้อยลงจึงไหลขึ้นสู่ด้านบนของถังน้ำ น้ำเย็นจึงไหลเข้ามาแทนที่ เหมาะสำหรับการใช้ในที่อยู่อาศัย หรือมีปริมาณการใช้ไม่สูงมาก
2. แบบใช้ปั๊มน้ำหมุนเวียน (force circulation) เหมาะสำหรับการใช้ผลิตน้ำร้อนจำนวนมาก และมีการใช้อย่างต่อเนื่อง เช่น โรงแรม โรงพยาบาล อุตสาหกรรม เป็นต้น
3. แบบผสมผสาน เป็นการนำเทคโนโลยีผลิตน้ำร้อนจากแสงอาทิตย์มาผสมผสานกับความร้อนเหลือทิ้ง เช่น การระบายความร้อนของเครื่องทำความเย็นหรือเครื่องปรับอากาศ จากหม้อต้มน้ำจากปล่องไอเสีย เป็นต้น โดยผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (heat exchanger) เพื่อลดขนาดพื้นที่แผงรับแสงอาทิตย์ และใช้ทรัพยากรที่มีอยู่อย่างคุ้มค่า

2.4.2 ประเภทของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (solar collector) [15]

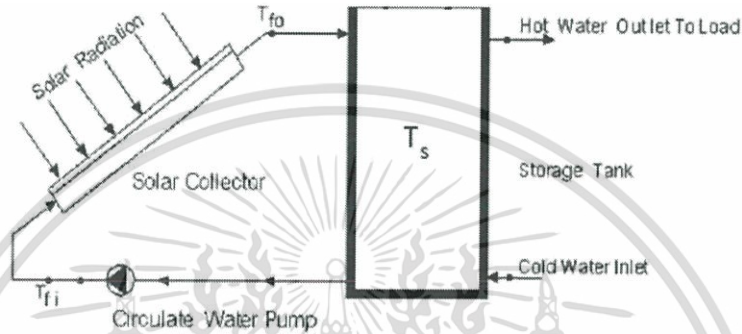
โดยทั่วไปแผงรับแสงอาทิตย์ สามารถจำแนกได้เป็น 3 ประเภท ดังนี้

1. แผงรับแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ (flat plate solar collector) เป็นแผงรับแสงอาทิตย์ที่สามารถใช้ในการผลิตน้ำร้อนในช่วง 40-90 องศาเซลเซียส ไม่มีอุปกรณ์ให้เคลื่อนที่ตามดวงอาทิตย์
2. แผงรับแสงอาทิตย์แบบหลอดสุญญากาศ (evacuated tube solar collector) มีลักษณะเป็นหลอดแก้วสองชั้น ระหว่างชั้นเป็นสุญญากาศ ภายในเคลือบด้วยสารดูดกลืนรังสี มีประสิทธิภาพสูงสำหรับการผลิตน้ำร้อนที่อุณหภูมิสูงประมาณ 100-200 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. สระแสงอาทิตย์ (solar pond) เป็นแผ่นรับแสงอาทิตย์ที่สามารถใช้ในการผลิตน้ำร้อนที่อุณหภูมิต่ำลงไม่มีอุปกรณ์บังคับให้เคลื่อนที่ตามดวงอาทิตย์ ได้แก่ ชนิดตื้น (shallow solar pond) ผลิตน้ำร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 40-60 องศาเซลเซียส และชนิดลึก (deep or salt gradient solar pond) ผลิตน้ำร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 40-90 องศาเซลเซียส

2.4.3 การถ่ายความร้อนภายในระบบทำน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ [16]



รูปที่ 2.4 การถ่ายความร้อนภายในระบบทำน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์

จากรูปที่ 2.6 พิจารณาการถ่ายเทความร้อนที่สภาวะคงตัว (steady state) ความร้อนที่ได้รับจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์ สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.6

$$Q_{coll} = [F_R(\tau\alpha)_e I_T - F_R U_L (T_f - T_a)] \tag{2.6}$$

สมการที่ 2.6 มีอีกชื่อเรียกหนึ่งว่า สมการของ Hottel-Willier-Bliss โดย

- Q_{coll} คือ ความร้อนที่ได้รับจากตัวเก็บรังสีชนิดแผ่นเรียบ (W)
- \dot{m} คือ อัตราการไหลของน้ำ (kg/s)
- c_p คือ ความจุความร้อนจำเพาะน้ำ (J/kg K)
- T_f คือ อุณหภูมิน้ำขาเข้าตัวเก็บรังสีชนิดแผ่นเรียบ ($^{\circ}C$)
- T_a คือ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ($^{\circ}C$)
- A_c คือ พื้นที่ตัวเก็บรังสีชนิดแผ่นเรียบ (m^2)
- $F_R(\tau\alpha)_e$ คือ คุณลักษณะเชิงแสง
- $F_R U_L$ คือ คุณลักษณะเชิงการสูญเสียความร้อน ($W/m^2 K$)
- I_T คือ ค่าความเข้มรังสีของแสงอาทิตย์ (W/m^2)

จากสมดุลพลังงาน (energy balance) ที่ถังเก็บน้ำ

$$A_C[F_R(\tau\alpha)_e I_T - F_R U_L(T_f - T_a)] = (M c_p)_s \frac{dT_s}{dt} + (UA)_s(T_s - T_a) + \dot{m}_{Li} C_p(T_{Lo} - T_{Li}) \quad (2.7)$$

เมื่อพิจารณากรณีที่ไม่มีการนำน้ำไปใช้งาน จากสมการที่ 2.7 จะลดรูปเป็นสมการที่ 2.8

$$A_C[F_R(\tau\alpha)_e I_T - F_R U_L(T_f - T_a)] = (M c_p)_s \frac{dT_s}{dt} + (UA)_s(T_s - T_a) \quad (2.8)$$

$$A_C[F_R(\tau\alpha)_e I_T - F_R U_L(T_f - T_a)] = (M c_p)_s \frac{(T_s^{t+\Delta t} - T_s)}{\Delta t} + (UA)_s(T_s - T_a) \quad (2.9)$$

โดย

M	คือ	มวลของน้ำ (kg)
c_p	คือ	ความจุความร้อนจำเพาะน้ำ (J/kg K)
$T_s^{t+\Delta t}$	คือ	อุณหภูมิน้ำในถังเก็บ เมื่อเวลาเปลี่ยนไป (°C)
T_s	คือ	อุณหภูมิน้ำในถังเก็บ (°C)
T_a	คือ	อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมภายนอก (°C)
U	คือ	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจากตัวถังเก็บน้ำ ($W/m^2 K$)
A_C	คือ	พื้นที่ผิวของถังเก็บน้ำ (m^2)

สามารถคำนวณหาอุณหภูมิน้ำในถังเก็บ เมื่อเวลาเปลี่ยนไปได้โดยการจัดรูปสมการที่ 2.9 เป็นสมการที่ 2.10

$$T_s^{t+\Delta t} = T_s + \frac{\Delta t [A_C[F_R(\tau\alpha)_e I_T - F_R U_L(T_f - T_a)] - (UA)_s(T_s - T_a)]}{(M c_p)_s} \quad (2.10)$$

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.5.1 การปรับปรุงค่าสภาพการนำความร้อนของพาราฟิน

Motahar และคณะ [5] ได้ทำการศึกษาถึงคุณสมบัติเกี่ยวกับค่าสภาพการนำความร้อนของวัสดุเปลี่ยนสถานะและความหนืดของวัสดุเปลี่ยนสถานะเมื่ออยู่ในสถานะของเหลว ทดลองโดยการนำซิลิกาที่มีขนาดระดับนาโนเมตร โดยที่มีขนาดรูพรุนแบบมีโซพอร์เติมลงไปในตัววัสดุเปลี่ยนสถานะ ซึ่งวัสดุเปลี่ยนสถานะที่ใช้ คือ พาราฟิน ชนิด n-octadecane ที่มีจุดหลอมเหลวอยู่ที่ 27.5 องศาเซลเซียส ซึ่งพาราฟินจะถูกทำให้หลอมเหลวภายใต้สุญญากาศ หลังจากนั้นจึงเติมอนุภาคนาโนซิลิกา ลงไป ในงานวิจัยมีการเปรียบเทียบโดยเปลี่ยนแปลงปริมาณอนุภาคนาโนซิลิกาที่เติมลงในพาราฟินเป็นร้อยละ 1 ร้อยละ 3 และร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก จากผลการทดลองพบว่าพาราฟินที่ผ่านการเติมอนุภาคนาโนซิลิกาจะอยู่ในสถานะของแข็งที่อุณหภูมิ 5-20 องศาเซลเซียส โดยค่าสภาพการนำความร้อนที่เพิ่มขึ้นมากที่สุด คือ ร้อยละ 5.1 ซึ่งเกิดจากการเติมอนุภาคนาโนซิลิกาปริมาณร้อยละ 3 และเมื่อปริมาณซิลิกาที่เติมลงไปมากกว่าร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก การเพิ่มขึ้นของค่าสภาพการนำความร้อน

ไม่ต่างกันใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะไม่เป็นรูปแบบที่แน่นอน และพาราฟินที่ผ่านการเติมซิลิกาจะอยู่ในสถานะของเหลวที่ 25-55 องศาเซลเซียส โดยค่าสภาพการนำความร้อนจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มปริมาณของซิลิกาที่เติมลงไป

Aditya Pinto [17] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการพัฒนาคุณสมบัติของพาราฟินแว็กซ์ที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งานในระบบถ่ายเทความร้อนของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ โดยมีวัตถุประสงค์หลักคือการปรับปรุงค่าความจุความร้อนจำเพาะและค่าสภาพการนำความร้อนของพาราฟินแว็กซ์ ทำการทดลองโดยผสมพาราฟินแว็กซ์ปริมาณร้อยละ 95 อนุภาคนาโนซิลิกาขนาด 80 นาโนเมตร ปริมาตรร้อยละ 3 และโพลีเอทิลีนไกลคอลปริมาณร้อยละ 2 ลงในขวดแก้ว เมื่อผสมสารเข้ากันแล้วจะใส่เอทานอลเป็นปริมาตร 2/3 ของปริมาตรขวดแก้ว จากนั้นผสมสารทั้งหมดให้เข้าด้วยกันได้ดียิ่งขึ้นด้วยเครื่องล้างความถี่สูง ซึ่งอุณหภูมิที่ใช้จะต้องเป็นอุณหภูมิที่ทำให้พาราฟินแว็กซ์และโพลีเอทิลีนไกลคอลหลอมเหลว เป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นระเหยเอทานอลออก เมื่อได้วัสดุก็เก็บความร้อนออกมา จึงทำการวัดค่าความจุความร้อนจำเพาะและค่าสภาพการนำความร้อนของวัสดุ ซึ่งเครื่องวัดสภาพการนำความร้อนของวัสดุได้มีการออกแบบขึ้นมาเอง และเครื่องวัดค่าความจุความร้อนจำเพาะและความร้อนแฝงการหลอมเหลววัดด้วยดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (differential scanning calorimetry, DSC) จากผลการวิเคราะห์พบว่าค่าความจุความร้อนจำเพาะเพิ่มขึ้นจากเดิมร้อยละ 7.30 และค่าสภาพการนำความร้อนเพิ่มขึ้นจากเดิมร้อยละ 25.14 ส่วนค่าความร้อนแฝงการหลอมเหลวนั้นมีความแตกต่างกันน้อยมาก จึงถือได้ว่าความแตกต่างที่เกิดขึ้นไม่มีนัยสำคัญ

2.5.2 การสกัดซิลิกาจากเถ้าแกลบ

U. Kalapathy และคณะ [18] สกัดซิลิกาจากเถ้าแกลบด้วย 3 ขั้นตอน คือ การล้างด้วยกรด (acid washing) การสกัดซิลิกา (silica extraction) และการทำให้ซิลิกาบริสุทธิ์ (purified silica) ซึ่งในขั้นตอนการล้างด้วยกรดได้ทดลองเปลี่ยนแปลงค่า pH ของสารผสมให้เป็น 1 3 5 และ 7 เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุด พบว่าที่ pH เป็น 1 จะเป็นสภาวะที่มีประสิทธิภาพอย่างมากต่อการกำจัดแคลเซียม เหล็ก และแมงกานีส แต่ถ้าหากสิ่งปนเปื้อนเหล่านี้ไม่ได้มีปริมาณมาก สามารถใช้ที่ pH เป็น 7 ได้ และในขั้นตอนการสกัดซิลิกาได้ทดลองเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้เป็น 0.1 0.25 0.5 และ 1 นอร์มอล พบว่าที่ความเข้มข้น 1 นอร์มอลจะได้ร้อยละของผลผลิตมากที่สุด

สันติ รัตนวิรันนท์ [19] ทำการศึกษาทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมซิลิกาจากเถ้าแกลบ เพื่อให้ได้ซิลิกาที่มีความบริสุทธิ์ พบว่าเถ้าแกลบที่เผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง และการแช่สารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 3 นอร์มอล ซึ่งเป็นความเข้มข้นที่เหมาะสมที่สุดในการเตรียมซิลิกาบริสุทธิ์ เนื่องจากสามารถทำให้สารไฮโดรคาร์บอนละลายตัวได้หมดเมื่อมีการนำไปเผา

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการ

3.1 สารเคมี และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 สารเคมี

1. พาราฟิน
2. ถ้ำกลบ
3. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxide, NaOH)
4. กรดไฮโดรคลอริก (hydrochloric acid, HCl)
5. เอทานอล (ethanol, EtOH)
6. น้ำกลั่น (deionized water)

3.1.2 อุปกรณ์ และเครื่องมือ

1. เครื่องกวนสารละลาย (magnetic stirrer) และแท่งแม่เหล็ก (magnetic bar)
2. เครื่องปั่นเหวี่ยง (centrifuge) และหลอดเหวี่ยงแยก (centrifugal tube)
3. เครื่องชั่งแบบดิจิตอล ทศนิยม 5 ตำแหน่ง
4. เครื่องมือวัดค่าความเป็นกรดด่าง (pH-meter)
5. ตู้อบ (oven)
6. เทอร์โมมิเตอร์ (thermometer)
7. ขวดวัดปริมาตร (volumetric flask) ขนาด 250 500 มิลลิลิตร
8. ขวดรูปชมพู่ (erlenmeyer flask) ขนาด 250 มิลลิลิตร
9. ปีกเกอร์ (beaker) ขนาด 50 100 250 1000 มิลลิลิตร
10. ปิเปต (pipette) ขนาด 1 2 5 25 มิลลิลิตร
11. บิวเรต (burette) ขนาด 50 มิลลิลิตร
12. กระดาษกรอง (filter paper) บริษัท Whatman ขนาด 41 เส้นผ่านศูนย์กลาง 110 มิลลิเมตร
13. แท่งแก้ว (glass rod)
14. กรวยกรองแก้ว (glass funnel)
15. ขวดแก้วพร้อมฝาปิด (glass)
16. เครื่องล้างความถี่สูง (ultrasonic bath)
17. เครื่องมือวัดค่าสภาพการนำความร้อน thermal constant analyzer hot disk TCA
18. เครื่องมือวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของสาร ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่ง แคลอริมิเตอร์ (differential scanning calorimetry, DSC)
19. เครื่องมือวิเคราะห์โครงสร้างผลึกสารตัวอย่างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (x-ray diffactometer, XRD)
20. เครื่องมือวิเคราะห์ชนิดของธาตุและปริมาณธาตุในสารตัวอย่าง ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (x-ray fluorescence, XRF)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 วิธีการทดลอง

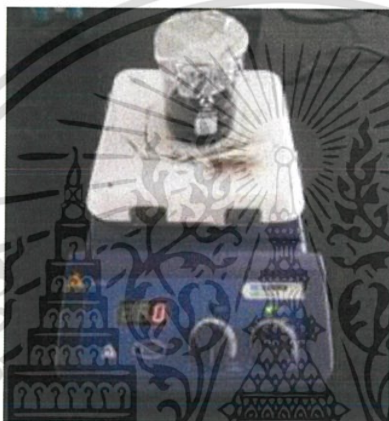
3.2.1 เตรียมเก้าแกลบที่ใช้เติมลงในพาราฟิน โดยการอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

3.2.2 เตรียมซิลิกาจากเก้าแกลบ เพื่อใช้เติมลงในพาราฟิน ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน

3.2.2.1 ขั้นตอนการล้างด้วยกรด (acid washing)

1. ชั่งเก้าแกลบ 10 กรัม และน้ำกลั่น 60 มิลลิลิตร เติมลงในบีกเกอร์ ปรับ pH ของสารผสมในบีกเกอร์ให้เท่ากับ 1 ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1 และ 6 นอร์มอล

2. กวนสารผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องกวนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นกรองสารที่ผ่านการกวนผสมด้วยกระดาษกรองขนาด 41 เส้นผ่านศูนย์กลาง 110 มิลลิเมตร



(ก)



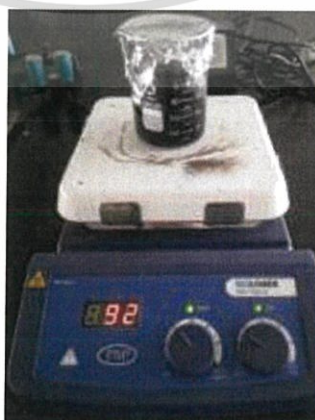
(ข)

รูปที่ 3.1 (ก) กวนสารผสมเก้าแกลบด้วยเครื่องกวน (ข) กรองสารที่ผ่านการกวนผสม

3. ล้างกระดาษกรองและบีกเกอร์ด้วยน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร และเก็บสารที่อยู่บนกระดาษกรอง

3.2.2.2 ขั้นตอนการสกัดซิลิกา (silica extraction)

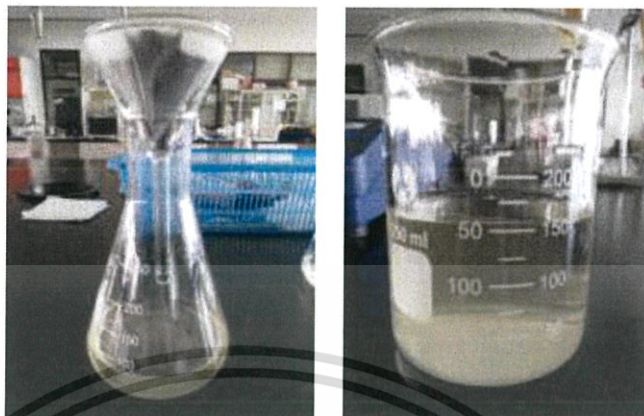
1. นำสารที่อยู่บนกระดาษกรองและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1 นอร์มอล 60 มิลลิลิตร เติมลงในขวดรูปชมพู่ จากนั้นให้ความร้อนและกวนสารผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องกวนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง



รูปที่ 3.2 ให้ความร้อนและกวนสารผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องกวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. กรองสารที่ผ่านการกวนผสมด้วยกระดาษกรองขนาด 41 เส้นผ่านศูนย์กลาง 110 มิลลิเมตร



(ก)

(ข)

รูปที่ 3.3 (ก) กรองสารที่ผ่านการกวนผสม (ข) สารที่ได้จากการกรอง

3. ล้างกระดาษกรองและบีกเกอร์ด้วยน้ำกลั่นต้มอุณหภูมิ 70-80 องศาเซลเซียส เป็น ปริมาตร 100 มิลลิลิตร จากนั้นทิ้งให้สารผสมมีอุณหภูมิลดลงจนเท่ากับอุณหภูมิห้อง

4. ปรับ pH ให้เป็น 7 ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1 นอร์มอล พร้อม กับกวนสาร จากนั้นทิ้งสารไว้ในบีกเกอร์เป็นเวลา 18 ชั่วโมง เพื่อให้เกิดเจล



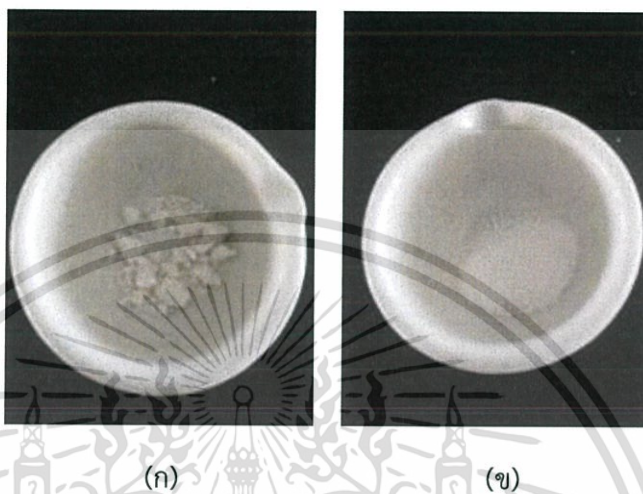
รูปที่ 3.4 ลักษณะเจลที่เกิดขึ้น

5. เมื่อครบกำหนดเวลาเติมน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร ลงในเจล จากนั้นนำสารเข้าเครื่องปั่น เหวี่ยงด้วยความเร็ว 2500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที แยกส่วนข้างบนที่เป็นของเหลวออกและ เก็บส่วนตะกอนที่อยู่ส่วนล่างไว้ นำตะกอนที่แยกไว้ใส่ลงในบีกเกอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

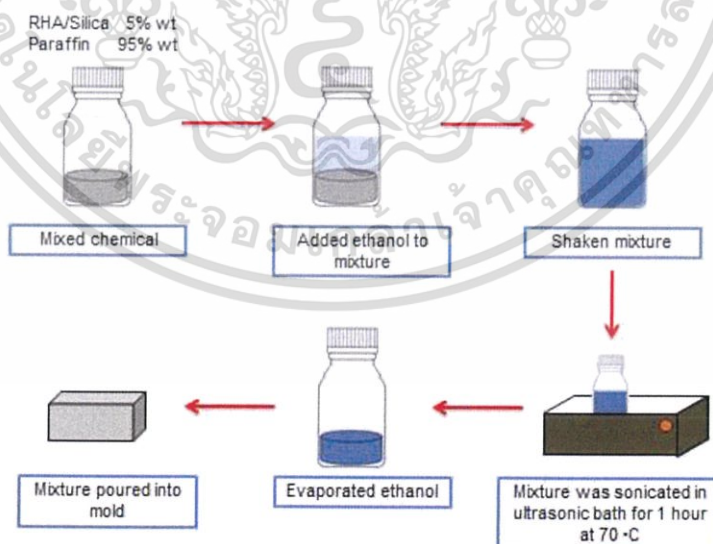
3.2.2.3 ขั้นตอนการทำซิลิกาให้บริสุทธิ์ (purified silica)

1. xerogels ด้วยน้ำกลั่น
2. นำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมง จากนั้นจะได้ซิลิกาบริสุทธิ์ออกมา



รูปที่ 3.5 (ก) ซิลิกา (ข) ซิลิกาที่ผ่านการบด

3.2.3 เติมสารที่ได้จากการเตรียมในข้อ 3.2.1 และข้อ 3.2.2 ลงในพาราฟิน โดยปริมาณของสารที่เติมลงไปในพาราฟินคิดเป็นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก



รูปที่ 3.6 การเติมแก้วเคลือบและซิลิกาที่สกัดได้จากแก้วเคลือบลงในพาราฟิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ผสมเถ้าแกลบเป็นปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนักลงไปในพาราฟิน จากนั้นทำการเขย่าให้สารทั้งสองเกิดการผสมกัน



รูปที่ 3.7 การผสมเถ้าแกลบกับพาราฟินและการผสมซิลิกากับพาราฟิน

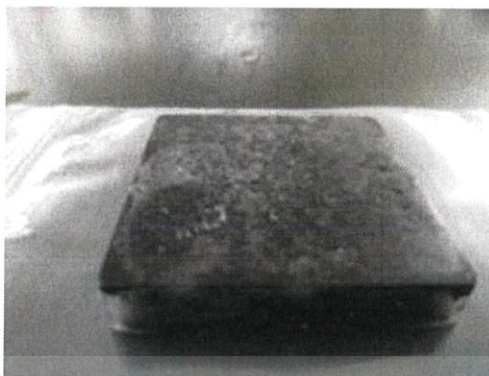
2. เติมเอทานอลลงไปประมาณ 2/3 ของปริมาตรขวด จากนั้นทำการเขย่าขวดให้สารเกิดการผสมกัน
3. นำไปผสมให้เข้ากันมากยิ่งขึ้นโดยใช้เครื่องล้าความถี่สูง ซึ่งควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที



รูปที่ 3.8 การผสมเถ้าแกลบกับพาราฟินและการผสมซิลิกากับพาราฟินโดยใช้เครื่องล้าความถี่สูง

4. ระเหยเอทานอล และใส่สารที่ผ่านการระเหยเอทานอลลงไปแบบหล่อขึ้นรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 พาราฟินที่ผ่านการเติมเถ้าแกลบ



รูปที่ 3.10 พาราฟินที่ผ่านการเติมซิลิกาที่สกัดได้จากเถ้าแกลบ

3.2.4 ตรวจวัดค่าคุณสมบัติทางความร้อนของวัสดุ ได้แก่ อุณหภูมิการหลอมเหลวของวัสดุ (melting temperature) ความร้อนแฝงการหลอมเหลว (heat of fusion) ด้วยเครื่อง differential scan calorimeter หรือ DSC ค่าความจุความร้อนจำเพาะของวัสดุ (specific heat capacity) และ ค่าสภาพการนำความร้อนของวัสดุ (thermal conductivity) ด้วยเครื่อง thermal constant analyzer (hot disk TCA)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

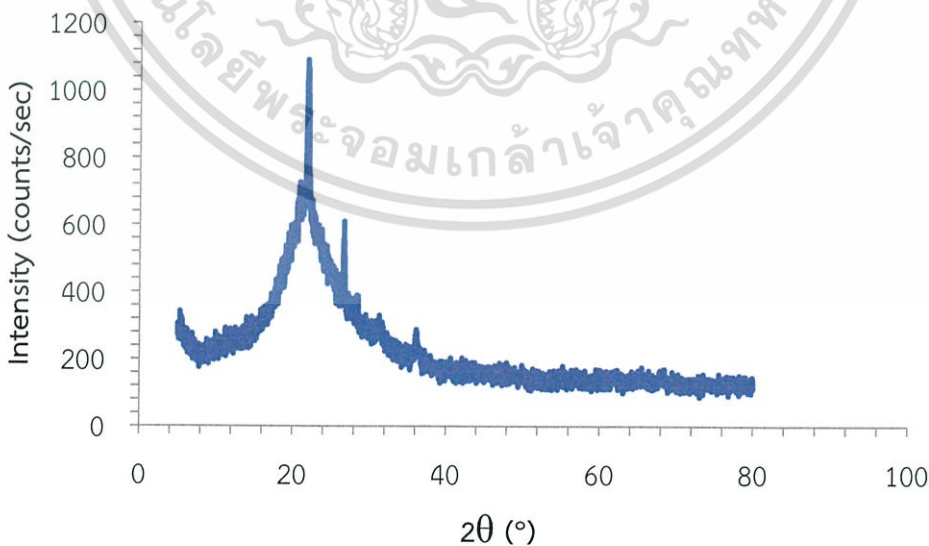
4.1 ผลการวิเคราะห์ค่าสภาพการนำความร้อนของวัสดุที่เก็บความร้อน

การวิเคราะห์ค่าสภาพการนำความร้อนของวัสดุที่เก็บความร้อนที่เตรียมขึ้นด้วยเครื่อง hot disk thermal constant analyzer (TCA) รุ่น TPS2500 มีผลการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าสภาพการนำความร้อนของวัสดุที่เก็บความร้อน

วัสดุที่เก็บความร้อน	ค่าสภาพการนำความร้อน (W/m K)
1. พาราฟิน	0.2808
2. พาราฟิน+แก้วเคลบ	0.2276
3. พาราฟิน+ซิลิกา	0.2329

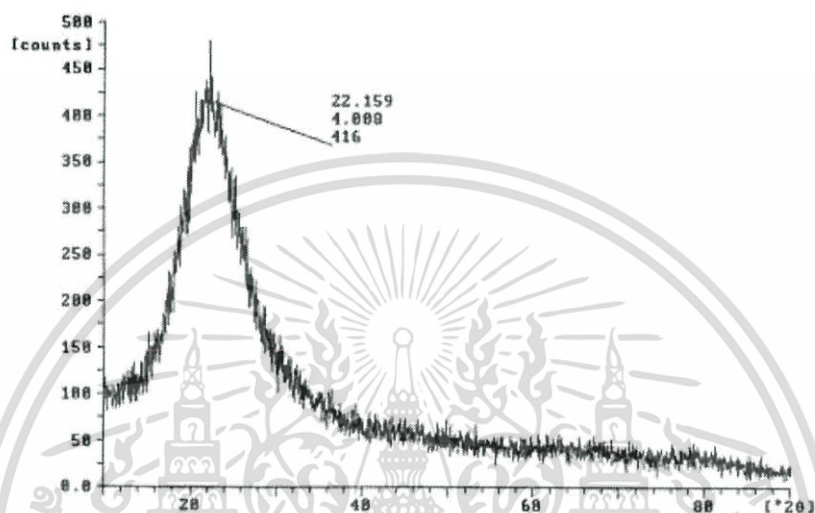
จากตารางที่ 4.1 จะเห็นว่าเมื่อเติมแก้วเคลบและซิลิกาเข้าไปในพาราฟิน จะส่งผลให้ค่าสภาพการนำความร้อนของวัสดุที่เก็บความร้อนที่เตรียมขึ้นมีค่าต่ำลง โดยค่าสภาพการนำความร้อนของพาราฟินที่เติมแก้วเคลบลดลงไปร้อยละ 18.95 และค่าสภาพการนำความร้อนของพาราฟินที่เติมซิลิกา ลดลงไปร้อยละ 17.06 ดังนั้นจึงได้ศึกษาถึงสาเหตุที่ทำให้ค่าสภาพการนำความร้อนต่ำลง โดยสาเหตุสำคัญที่ส่งผลต่อการลดลงของค่าสภาพการนำความร้อน คือ โครงสร้างผลึกของอนุภาคแก้วเคลบและซิลิกาที่เติมลงไปในพาราฟิน จึงได้วิเคราะห์โครงสร้างผลึกของอนุภาค ซึ่งสามารถทำได้โดยเครื่องมือวิเคราะห์โครงสร้างผลึกสาร ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์



รูปที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของของแก้วเคลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.1 เป็นผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของแก้วแกลบ โดยแกน x คือ 2-theta-scale และแกน y คือ intensity ใช้ความละเอียดสแกนที่ 2θ และลำดับชั้นของการสแกนอยู่ระหว่าง 5-80 องศา พบว่าพีคปรากฏที่สามารถเห็นได้ชัดเจนอยู่ที่ตำแหน่ง $2\theta = 22$ เมื่อเปรียบเทียบกับพีคมาตรฐาน (x-ray diffractometer pattern) พบว่าตรงกับพีคของซิลิกาที่มีโครงสร้างแบบอสัณฐาน (amorphous solid) [20]



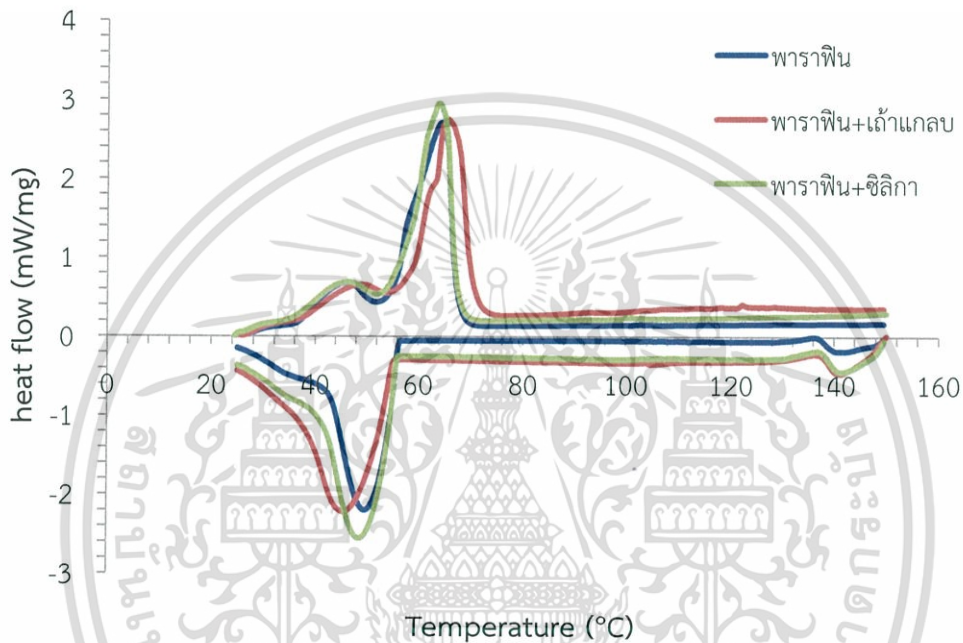
รูปที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของซิลิกาที่สกัดได้จากแก้วแกลบ [18]

จากรูปที่ 4.2 เป็นการศึกษาโครงสร้างผลึกของแก้วแกลบ โดยแกน x คือ 2-theta-scale และแกน y คือ intensity ใช้ความละเอียดสแกนที่ 2θ และลำดับชั้นของการสแกนอยู่ระหว่าง 0-90 องศา พบว่าพีคปรากฏที่สามารถเห็นได้ชัดเจนอยู่ที่ตำแหน่ง $2\theta = 22.159$ เมื่อเปรียบเทียบกับพีคมาตรฐานแล้วพบว่าตรงกับพีคของซิลิกาที่มีโครงสร้างแบบอสัณฐาน

จากรูปที่ 4.1 และรูปที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่าแก้วแกลบและซิลิกาที่สกัดได้จากแก้วแกลบมีโครงสร้างเป็นแบบอสัณฐาน ซึ่งโครงสร้างแบบอสัณฐานจะขัดขวางการเดินทางของโฟนอน ซึ่งเป็นตัวกลางที่ใช้ในการถ่ายเทความร้อนในพาราฟิน โดยทำให้โฟนอนเกิดการกระเจิง (phonon scattering effect) ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดสภาพต้านความร้อน ส่งผลให้ค่าสภาพการนำความร้อนของพาราฟินที่เติมแก้วแกลบและพาราฟินที่เติมซิลิกาที่สกัดได้จากแก้วแกลบมีค่าต่ำลง

4.2 ผลการวิเคราะห์จุดหลอมเหลวและความร้อนแฝงการหลอมเหลวของวัสดุักเก็บความร้อน

การวิเคราะห์จุดหลอมเหลวและความร้อนแฝงการหลอมเหลวของวัสดุักเก็บความร้อนที่เตรียมขึ้นสามารถวิเคราะห์ได้ด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ โดยใช้อัตราการให้ความร้อนและอัตราการเย็นตัวที่ 10 องศาเซลเซียสต่ออนาที เพื่อศึกษาลักษณะการดูดซับความร้อนระหว่างการเปลี่ยนสถานะของวัสดุักเก็บความร้อนที่เตรียมขึ้น



รูปที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC ของวัสดุักเก็บความร้อน

จากรูปที่ 4.3 แสดงผลการทดสอบ DSC ของวัสดุักเก็บความร้อนที่เตรียมขึ้น ซึ่งสามารถสรุปข้อมูลจากกราฟเป็นจุดหลอมเหลวและความร้อนแฝงการหลอมเหลวได้ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 จุดหลอมเหลวและค่าความร้อนแฝงการหลอมเหลวของวัสดุักเก็บความร้อน

วัสดุักเก็บความร้อน	จุดหลอมเหลว (°C)	ความร้อนแฝงการหลอมเหลว (J/kg)
1) พาราฟิน	64.4	165.1
2) พาราฟิน+แก้วกลบ	65.5	162.3
3) พาราฟิน+ซิลิกา	63.8	165.4

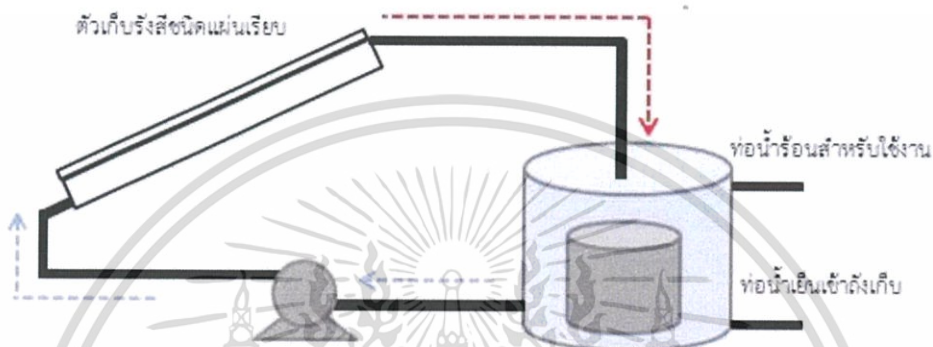
อุณหภูมิหลอมเหลวและค่าความร้อนแฝงการหลอมเหลวของวัสดุักเก็บความร้อนที่เตรียมได้ พบว่าความแตกต่างระหว่างค่าที่วิเคราะห์ได้จากพาราฟินและค่าที่วิเคราะห์ได้จากเติมแก้วกลบและซิลิกาปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนักลงไปในพาราฟินมีความแตกต่างกันน้อยกว่าร้อยละ 2 ซึ่งไม่มี

นัยสำคัญต่อการพิจารณา
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การออกแบบระบบทำน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์

การออกแบบระบบทำน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ ด้วยการนำวัสดุที่เก็บความร้อนที่เตรียมได้ในข้างต้นมาประยุกต์ใช้ แต่เนื่องด้วยผลการทดลองจากหัวข้อ 4.1 ทำให้ทราบว่าไม่สามารถเพิ่มค่าสภาพการนำความร้อนของพาราฟินได้ด้วยการเติมเก้าแกลบและซิลิกาที่สกัดได้จากเก้าแกลบ เพราะฉะนั้นในการออกแบบระบบทำน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ จึงจะใช้เพียงพาราฟินเท่านั้น

4.3.1 ระบบทำน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์



รูปที่ 4.4 การออกแบบระบบทำน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์

จากรูปที่ 4.4 แสดงระบบทำน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งประกอบด้วยตัวเก็บรังสีชนิดแผ่นเรียบ ปั๊มน้ำ และถังเก็บน้ำที่มีถังบรรจุพาราฟินอยู่ภายใน การทำงานของระบบจะเริ่มจากน้ำไหลเข้าสู่ถังเก็บน้ำจนได้ปริมาณที่ต้องการ หลังจากนั้นน้ำจะเข้าสู่ปั๊ม เพื่อเพิ่มความดันให้น้ำสามารถไหลเข้าสู่ตัวเก็บรังสีชนิดแผ่นเรียบได้ ซึ่งภายในตัวเก็บรังสีชนิดแผ่นเรียบจะมีการแลกเปลี่ยนความร้อนเกิดขึ้น ทำให้น้ำที่ออกจากตัวเก็บรังสีชนิดแผ่นเรียบมีอุณหภูมิสูงขึ้น หลังจากนั้นจะไหลเข้าสู่ถังเก็บน้ำ และเกิดการหมุนเวียนไปเรื่อยๆ ซึ่งจากการหมุนเวียนน้ำที่เกิดขึ้นจะทำให้อุณหภูมิของน้ำเพิ่มสูงขึ้น

สมมติฐานในการคำนวณ

- 1) สภาวะคงตัว (steady state)
- 2) พิจารณาในกรณีที่ไม่มีการนำน้ำไปใช้งาน
- 3) การถ่ายเทความร้อนระหว่างน้ำและพาราฟินเกิดได้ดีมาก ทำให้สามารถอนุมานได้ว่าอุณหภูมิของน้ำและอุณหภูมิพาราฟินมีค่าเท่ากัน
- 4) ไม่มีการสูญเสียความร้อนเกิดขึ้นบริเวณท่อ
- 5) การสูญเสียความร้อนที่เกิดขึ้นบริเวณถังเก็บน้ำพิจารณาในรูปแบบของทรงกระบอก โดยเป็นการคำนวณในสภาวะคงตัวหนึ่งมิติ
- 6) ขณะที่พาราฟินเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลว หรือเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นของแข็งอุณหภูมิจะคงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ข้อมูลการออกแบบระบบทำน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์

รายการ	ค่า
ตัวเก็บรังสีชนิดแผ่นเรียบ [21]	
มุมที่ทำกับพื้น	18°
พื้นที่ผิว	2.16 m ²
ความกว้าง	1.08 m
ความยาว	2.00 m
$F_R(\tau\alpha)_e$	0.816
$F_R U_L$	7.123 W/m ² K
อัตราการไหลของน้ำเข้าตัวเก็บรังสีชนิดแผ่นเรียบต่อหน่วยพื้นที่	0.02 kg/s m ²
พาราฟิน	
มวลพาราฟิน	30 kg
จุดหลอมเหลว	64.40 °C
ความร้อนแฝงการหลอมเหลว (L_{fp})	165.10 J/kg
ความจุความร้อนจำเพาะ ($C_{pp, s}$)	2.50 MJ/m ³ K
ความจุความร้อนจำเพาะ ($C_{pp, l}$) [22]	2.98 kJ/kg K
ความหนาแน่น [23]	900 kg/m ³
อุณหภูมิพาราฟินเริ่มต้น	30 °C
น้ำ [24]	
มวลน้ำ	100 kg
ความจุความร้อนจำเพาะ (C_{pw})	4.19 kJ/kg K
ความหนาแน่น ที่ 25 °C	996.50 kg/m ³
อุณหภูมิน้ำเริ่มต้น	30 °C
สัมประสิทธิ์การพาความร้อนอิสระ [25]	
อากาศ (h_i)	2.50 W/m ² K
น้ำ (h_o)	100 W/m ² K
ถังเก็บน้ำ (water storage tank)	
เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของถังเก็บ (D_i)	0.60 m
เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของถังเก็บ (D_o)	0.6005 m
ความสูงของถังเก็บ (L)	0.60 m
ความหนาของถังเก็บ	0.50 mm
ค่าสภาพการนำความร้อนของสแตนเลส (stainless steel) [26]	16 W/m K
ถังพาราฟิน (paraffin storage tank)	
เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของถังเก็บ	0.37 m
ความสูงของถังเก็บ	0.37 m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 การคำนวณอุณหภูมิน้ำในถังเก็บ ณ ช่วงเวลาต่างๆ ภายใน 1 วัน

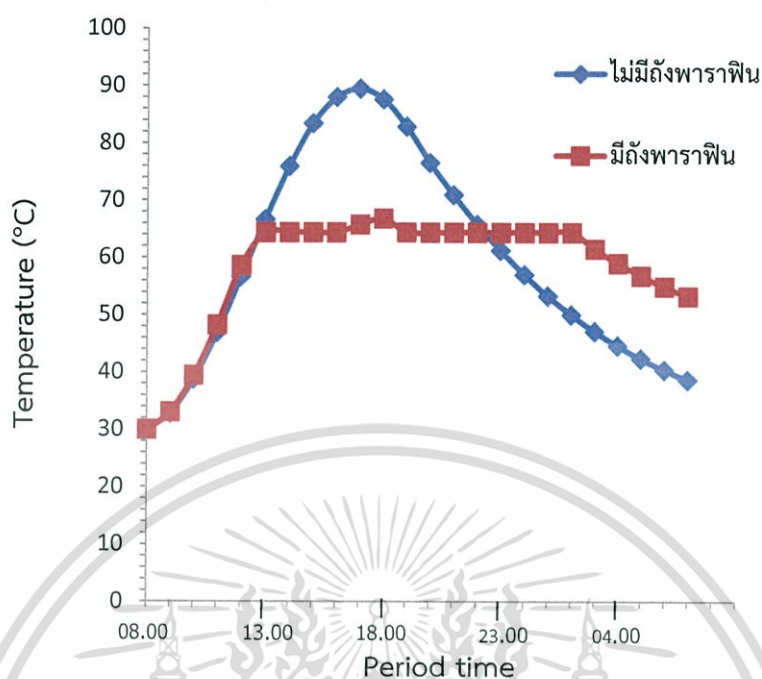
ตารางที่ 4.4 ผลการคำนวณอุณหภูมิน้ำในถังเก็บ ณ ช่วงเวลาต่างๆ ภายใน 1 วัน เปรียบเทียบระหว่างถังเก็บน้ำที่ไม่มีถังบรรจุพาราฟิน และถังเก็บน้ำที่มีถังบรรจุพาราฟิน

เวลา (น.)	ค่าความเข้มรังสี แสงอาทิตย์ (W/m^2)	อุณหภูมิอากาศ ($^{\circ}C$)	อุณหภูมิน้ำในถังเก็บ ($^{\circ}C$)	
			ไม่มีถังบรรจุ พาราฟิน	มีถังบรรจุพาราฟิน
08:00	261.40	28	30.00	30.00
09:00	539.18	30	32.81	33.04
10:00	793.91	30	38.75	39.46
11:00	989.87	32	46.95	48.26
12:00	1,107.31	32	56.69	58.64
13:00	1,135.82	34	66.63	64.40
14:00	1,072.94	34	75.94	64.40
15:00	924.10	32	83.41	64.40
16:00	702.97	32	88.01	64.40
17:00	433.93	32	89.48	65.77
18:00	164.45	32	87.64	66.85
19:00	0	30	86.63	64.42
20:00	0	30	85.59	64.40
21:00	0	28	84.58	64.40
22:00	0	28	83.55	64.40
23:00	0	26	82.53	64.40
24:00	0	26	81.50	64.40
01:00	0	26	80.49	64.40
02:00	0	26	79.50	64.40
03:00	0	26	78.52	61.53
04:00	0	26	77.56	59.03
05:00	0	26	76.62	56.85
06:00	0	26	75.70	54.96
07:00	0	28	74.79	53.31

หมายเหตุ : 1) ความเข้มรังสีของแสงอาทิตย์จากการคำนวณข้อมูลประจำวันวันที่ 13 เมษายน พ.ศ.2554 [27]

2) อุณหภูมิแต่ละช่วงเวลาเป็นการประเมินจากอุณหภูมิเฉลี่ย อุณหภูมิสูงสุดเฉลี่ย และอุณหภูมิต่ำสุดเฉลี่ยในเดือนเมษายน พ.ศ.2554

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 อุณหภูมิของระบบทำน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ในช่วงเวลา 1 วัน

จากรูปที่ 4.5 แสดงอุณหภูมิของระบบทำน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ในช่วงเวลา 1 วัน เปรียบเทียบระหว่างถังเก็บน้ำที่ไม่มีถังบรรจุพาราฟิน และถังเก็บน้ำที่มีถังบรรจุพาราฟิน จากรูปจะเห็นว่าในช่วงเริ่มต้นระหว่างเวลา 08.00-13.00 น. การเพิ่มอุณหภูมิของน้ำในถังเก็บน้ำที่ไม่มีถังบรรจุพาราฟินอยู่จะสูงกว่าในถังเก็บน้ำที่มีถังบรรจุพาราฟินค่อนข้างมาก เนื่องจากความร้อนที่ได้รับจากตัวเก็บรังสีชนิดแผ่นเรียบถ่ายเทให้กับน้ำในถังทั้งหมด ส่วนสาเหตุที่ทำให้ในถังเก็บน้ำที่มีถังบรรจุพาราฟินมีการเพิ่มอุณหภูมิของน้ำในระดับที่ต่ำกว่า เนื่องจากความร้อนที่ได้รับถูกถ่ายเทให้กับทั้งน้ำและพาราฟินที่บรรจุอยู่ภายในถัง

ในช่วงเวลาระหว่าง 13.00-16.00 น. อุณหภูมิของน้ำในถังเก็บน้ำที่ไม่มีถังบรรจุพาราฟินอยู่จะขึ้นสูงสุดที่ 89.48 องศาเซลเซียส และจะเริ่มลดอุณหภูมิลงเรื่อยๆตั้งแต่วันที่ 17.00 น. เป็นต้นไป เนื่องจากค่าความเข้มรังสีแสงอาทิตย์น้อยกว่าค่าความเข้มรังสีแสงอาทิตย์วิกฤติ ทำให้ระบบไม่สามารถให้ความร้อนแก่น้ำได้ และเมื่อเวลาผ่านไปจะเกิดการสูญเสียความร้อนให้กับอากาศภายนอกทั้งจากตัวถังเก็บน้ำและการไหลของน้ำผ่านตัวเก็บรังสีชนิดแผ่นเรียบ

ในถังเก็บน้ำที่มีถังบรรจุพาราฟิน ช่วงเวลา 13.00-16.00 น. จะเป็นช่วงที่อุณหภูมิของน้ำคงที่ที่ 64.40 องศาเซลเซียส เนื่องจากเป็นช่วงที่ความร้อนจากตัวเก็บรังสีชนิดแผ่นเรียบถูกใช้ในการเปลี่ยนสถานะพาราฟินจากของแข็งเป็นของเหลว ต่อมาในช่วงเวลา 17.00-18.00 น. จะเป็นช่วงที่อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เนื่องจากพาราฟินเปลี่ยนสถานะเป็นของเหลวทั้งหมดแล้ว หลังจากนั้นในช่วงเวลา 19.00 น. อุณหภูมิจะลดลงเหลือ 64.42 องศาเซลเซียส เนื่องจากค่าความเข้มรังสีแสงอาทิตย์น้อยกว่าค่าความเข้มรังสีแสงอาทิตย์วิกฤติ ทำให้ระบบไม่สามารถให้ความร้อนแก่น้ำได้ แต่อุณหภูมิของน้ำในถังเก็บน้ำที่มีถังบรรจุพาราฟินจะยังไม่ลดลงในทันที เนื่องจากพาราฟินที่อยู่ในสถานะของเหลวขณะนั้นจะเปลี่ยนสถานะเป็นของแข็ง ซึ่งในการเปลี่ยนสถานะจะมีการคาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความร้อนออกมาให้กับน้ำ ทำให้อุณหภูมิของน้ำคงที่ที่ 64.40 องศาเซลเซียส ในช่วงการเปลี่ยนสถานะของพาราฟิน ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้อัตราการลดลงของอุณหภูมิน้ำในระบบที่ใช้ถังเก็บน้ำที่มีถังบรรจุพาราฟินมีค่าน้อยกว่าระบบที่ใช้ถังเก็บน้ำที่ไม่มีถังบรรจุพาราฟิน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากผลการทดลองศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการนำเก้าอี้กลับมาปรับปรุงสมบัติการถ่ายเทความร้อนของพาราฟิน ซึ่งเป็นวัสดุเก็บพลังงานความร้อนประเภทเปลี่ยนสถานะ โดยตรวจสอบค่าสภาพการนำความร้อน อุณหภูมิการหลอมเหลวของและค่าความร้อนแฝงการหลอมเหลวของวัสดุ พบว่าเมื่อเติมเก้าอี้กลับและซิลิกาปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนักลงไปในพาราฟินจะส่งผลให้ค่าสภาพการนำความร้อนของพาราฟินลดลงไปร้อยละ 18.95 และ 17.06 ตามลำดับ ส่วนอุณหภูมิการหลอมเหลวของและค่าความร้อนแฝงการหลอมเหลวของวัสดุ พบว่าการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นไม่มีนัยสำคัญในการพิจารณา เนื่องจากความแตกต่างระหว่างค่าที่วิเคราะห์ได้จากพาราฟินและค่าที่วิเคราะห์ได้จากเติมเก้าอี้กลับและซิลิกาปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนักลงไปในพาราฟินมีความแตกต่างกันน้อยมาก

การนำข้อมูลจากผลการวิเคราะห์มาออกแบบระบบทำน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งเป็นระบบทำน้ำร้อนจากแสงอาทิตย์ที่มีถังเก็บพาราฟินบรรจุอยู่ในถังเก็บน้ำ จากผลการคำนวณเพื่อประเมินอุณหภูมิของน้ำในถังเก็บในเวลา 1 วัน โดยเปรียบเทียบกันระหว่างถังเก็บน้ำที่ไม่มีถังบรรจุพาราฟิน และถังเก็บน้ำที่มีถังบรรจุพาราฟิน พบว่าถังเก็บน้ำที่มีถังบรรจุพาราฟินจะส่งผลทำให้อัตราการลดลงของอุณหภูมิน้ำมีค่าน้อยกว่าระบบที่ใช้ถังเก็บน้ำที่ไม่มีถังบรรจุพาราฟิน

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในการออกแบบระบบทำน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ เป็นเพียงการประเมินในข้างต้นเท่านั้น ซึ่งอุณหภูมิที่ได้อาจสูงกว่าความเป็นจริง ดังนั้นจึงควรศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการสูญเสียความร้อนให้ครอบคลุม เพื่อให้ได้ผลการประเมินที่มีความละเอียดและแม่นยำมากขึ้น และศึกษาเพิ่มเติมในกรณีที่มีการนำน้ำไปใช้งานขณะที่ระบบทำน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์อยู่ในระหว่างดำเนินงานด้วย จากนั้นจึงจะสามารถนำข้อมูลที่ประเมินขึ้นไปใช้เป็นข้อมูลสำหรับการสร้างเครื่องใช้งานจริงขึ้นมาได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Tatsidjodoung, P.; Pierrès, N. L.; Luo, L. A Review of potential materials for thermal energy storage in building applications. *Renew. Sustainable Energy Rev.* 2013, 18, 327-349.
- [2] ชลธิศ เอี่ยมวรวิทย์ และวิทยา ยงเจริญ. 2550. อิทธิพลของสารเปลี่ยนสถานะในวัสดุโครงสร้างต่อพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของผนังเปลือกอาคาร. วารสารการประชุมเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 21.
- [3] กัญยรัตน์ โทละสุต และคณะ. 2551. วัสดุเปลี่ยนเฟสเพื่อช่วยรักษาความร้อนในเครื่องอบพลังงานแสงอาทิตย์. ผลงานวิจัย การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 22.
- [4] บุญรักษ์ กาญจนวรรณวิชัย. แก้วกลมของเหลือสารพัดประโยชน์. (ออนไลน์). แหล่งที่มา: <https://www.mtec.or.th/academic-services/mtec-knowledge/865-> 20 พฤศจิกายน 2559
- [5] Motahar, S.; Nikkam, N.; Alemrajabi, A. A.; Khodabandeh, R.; Toprak, M. S.; Muhammed, M. A novel phase change material containing mesoporous silica nanoparticles for thermal energy storage : A study on thermal conductivity and viscosity. *Int. Commun. Heat. Mass.* 2014, 56, 114-120.
- [6] Ahmed, S. F.; Khalid, M.; Rashmi, W.; Chan, A.; Shahbaz, K. Recent progress in solar thermal energy storage using nanomaterials. *Renew. Sustainable Energy Rev.* 2016, 67, 450-460.
- [7] บุรฉัตร ฉัตรวีระ และวัชรกร วงศ์คำจันทร์. 2544. พฤติกรรมของคอนกรีตผสมแก้วกลมละเอียด. วารสารการวิจัยและพัฒนา มจร. 24(3), 327-342.
- [8] Siamchemi. ซิลิกา. (ออนไลน์). แหล่งที่มา: <http://www.siamchemi.com/%E0%B8%8B%E0%B8%B4%E0%B8%A5%E0%B8%B4%E0%B8%81%E0%B8%B2/>, 20 พฤศจิกายน 2559
- [9] 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.
- [10] Blanic Trading & Projects. PARAFFIN WAX. (ออนไลน์). แหล่งที่มา: http://www.blanic.co.za/oil_paraffin.html. 8 พฤษภาคม 2560
- [11] Holman, J. P. *Heat transfer: Conduction Heat Transfer*. 10th ed.; McGraw Hill: New York, 2010.
- [12] David, W. R. *Modern Ceramic Engineering: Properties, Processing, and Use in Design*. 3rd ed.; Taylor & Francis Group: Boca Raton, 2006.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [13] วรธนะ โกศลวัฒน์. 2559. ผลกระทบของการนำแมงกานีสไปแทนที่โครเมียมในสารประกอบเตลาฟอสเฟต CuCrO_2 ที่ส่งผลต่อค่าสภาพการนำความร้อน เพื่อประยุกต์ใช้เป็นวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกส์. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [14] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. เทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์. (ออนไลน์). แหล่งที่มา:
http://www4.dede.go.th/dede/index.php?option=com_content&view=article&id=889&Itemid=56&lang=th . 10 พฤษภาคม
- [15] คู่มือการพัฒนาและการลงทุนผลิตพลังงานทดแทน ชุดที่ 2 พลังงานแสงอาทิตย์, กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน
- [16] กันต์พงศ์ มณีเล็ก และเจตตพล อภิชาติพิสัยสินธุ์. 2559. ระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบต้นทุนต่ำสำหรับใช้ในบ้านพักอาศัย. การประชุมวิชาการ เรื่อง การถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อนและกระบวนการ ครั้งที่ 15.
- [17] Aditya Pinto. 2016. Development of Paraffin Wax as a Phase Change Material for Thermal management in electronic systems. University of Texas at Arlington.
- [18] Kalapathy, U.; Proctor, A.; Shultz, J. A simple method for production of pure silica from rice hull ash. *Bioresour. Technol.* 2000, 73, 257-262.
- [19] สันติ รัตนวีรนนท์. 2548. เจียนไซท์ที่เหมาะสมในการเตรียมซิลิกาจากซีเถ้าแกลบ. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
- [20] Music, S.; Filipovic-Vincekovic, N.; Sekovanic, L. Precipitation of amorphous SiO_2 particles and their properties. *Brazilian Journal of Chemical Engineering.* 2011, 28, 89-94.
- [21] สราวุธ พลวงษ์ศรี และทงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์. 2556. การเพิ่มสมรรถนะทางความร้อนของระบบทำน้ำร้อนแสงอาทิตย์ที่มีปั๊มความร้อนเสริมโดยใช้สารละลายเงินนาโนในตัวรับรังสีอาทิตย์. วารสารวิชาการคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสุราษฎร์ธานี ปีที่ 6 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม 2556 – ธันวาคม 2556
- [22] N. Ukrainczyk; S. Kurajica ; J. Šipušić. Thermophysical comparison of five commercial paraffin waxes as latent heat storage materials. *Bioresour. Technol.* 2010, 24(2), 129-197.
- [23] Labobuy. PARAFFIN WAX 58-60°C (500 mg) MERCK. (ออนไลน์). แหล่งที่มา:
http://www.labobuy.com/index.php?route=product/product&product_id=711. 1 พฤษภาคม 2560
- [24] The Engineering Toolbox. Water - Thermodynamic Properties. (ออนไลน์). แหล่งที่มา:
http://www.engineeringtoolbox.com/water-thermal-properties-d_162.html. 1 พฤษภาคม 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

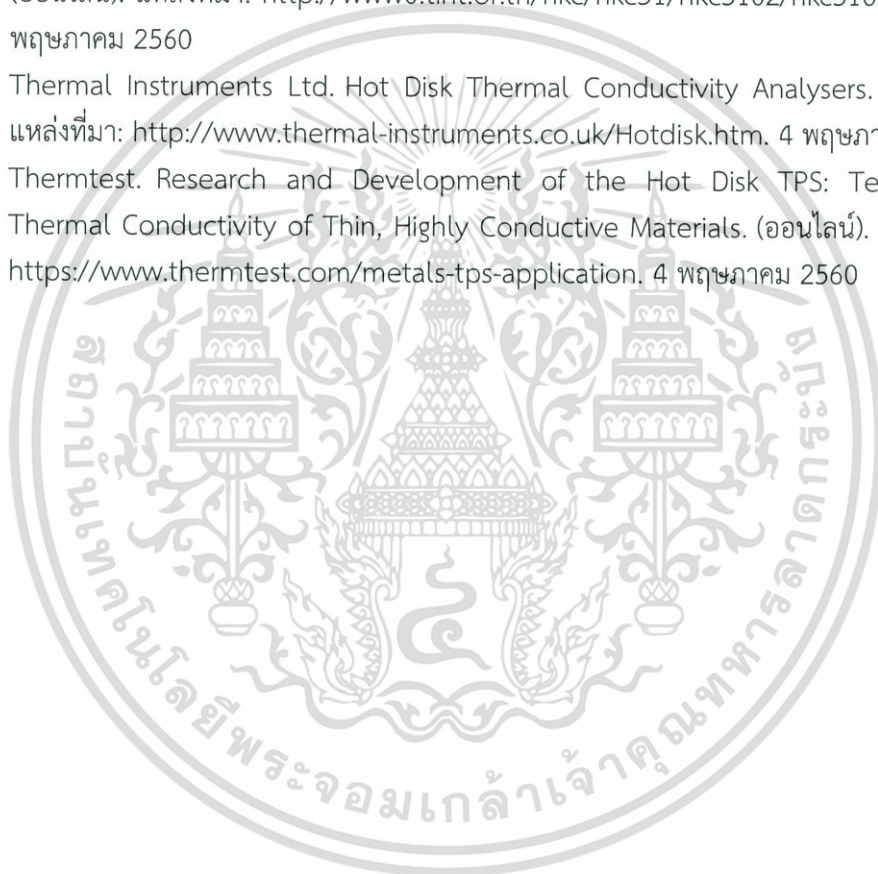
เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [25] Typical Convection Coefficients to Estimate Thermal Transfer. (ออนไลน์). แหล่งที่มา: <http://www.me.mtu.edu/~microweb/GRAPH/Intro/film.htm>. 1 พฤษภาคม 2560
- [26] The Engineering Toolox. Thermal Conductivity of common Materials and Gases. (ออนไลน์). แหล่งที่มา: http://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-d_429.html. 1 พฤษภาคม 2560
- [27] ชานนท์ ชูพงษ์. 2554. การพยากรณ์กำลังไฟฟ้าของระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อสายส่งโดยใช้ตัววัดรังสีดวงอาทิตย์ กรณีศึกษาระบบที่ติดตั้งในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
- [28] Kulkarni, M. V.; Deshmukh, D. S. Improving efficiency of solar water heater using phase change materials. *International Journal of Science, Spirituality, Business and Technology*. 2014, 3, 39-44.
- [29] S. Bharath S.; Kanithi, T.; Kolnati S.; Yaswanth R. Thermal analysis of solar flat plate collector using phase change material. *Indian Journal of Science and Technology*. 2016, 9(35), 1-7.
- [30] Bonsky Samson Samuel and Shaik Mohhamed Shafee. Experimental analysis on solar water heater with and without phase change materials. *Advances in Natural and Applied Sciences*. 2016, 10(9), 405-410.
- [31] เกียรติพงษ์ ได้การ. X-ray Diffractometer XRD. (ออนไลน์). แหล่งที่มา: <http://web2.mfu.ac.th/center/stic/x-ray-analysis-instrument-menu.html>. 4 พฤษภาคม 2560
- [32] ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์เพื่อมาตรฐานและอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. การวิเคราะห์องค์ประกอบของสารด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์(X-ray diffraction). (ออนไลน์). แหล่งที่มา: <http://science.kmutt.ac.th/sic/index.php/physics/16-x-ray-diffraction>. 4 พฤษภาคม 2560
- [33] Barbara, L. D.; Christine, M. C. Geochemical Instrumentation and Analysis. X-ray Powder Diffraction (XRD). (ออนไลน์). แหล่งที่มา: http://serc.carleton.edu/research_education/geochemsheets/techniques/XRD.html. 4 พฤษภาคม 2560
- [34] Thermo Scientific. หลักการของ Energy-Dispersive X-Ray Fluorescence (ED-XRF). (ออนไลน์). แหล่งที่มา: http://cleverich.com/xrf_work.html. 4 พฤษภาคม 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [35] บริษัท พาราไซแอนติฟิค จำกัด. XRF-1800 Sequential X-Ray Fluorescence Spectrometer. (ออนไลน์). แหล่งที่: <http://www.barascientific.com/products/shimadzu/scientific/emission/thai/XRF/XRF-1800.php>. 4 พฤษภาคม 2560
- [36] เกศินี เหมวิเชียร และพิริยธร สุวรรณมาลา. กลุ่มวิจัยและพัฒนาวัสดุศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน). เครื่องดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์. (ออนไลน์). แหล่งที่มา: <http://www0.tint.or.th/nkc/nkc51/nkc5102/nkc5102t.html>. 4 พฤษภาคม 2560
- [37] Thermal Instruments Ltd. Hot Disk Thermal Conductivity Analysers. (ออนไลน์). แหล่งที่มา: <http://www.thermal-instruments.co.uk/Hotdisk.htm>. 4 พฤษภาคม 2560
- [38] Thermtest. Research and Development of the Hot Disk TPS: Testing the Thermal Conductivity of Thin, Highly Conductive Materials. (ออนไลน์). แหล่งที่มา: <https://www.thermtest.com/metals-tps-application>. 4 พฤษภาคม 2560



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ข้อมูลดิบ

ก.1 ข้อมูลการทดลองสกัดซิลิกาจากเถ้าแกลบ

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลการทดลองสกัดซิลิกาจากเถ้าแกลบ

ครั้ง	น้ำหนักเถ้าแกลบ (g)	การปรับ pH เป็น 1			การไทเทรตให้ pH เป็น 7			น้ำหนักซิลิกา (g)
		ก่อน	หลัง	ปริมาตร HCl ที่ใช้ (ml)	ก่อน	หลัง	ปริมาตร HCl ที่ใช้ (ml)	
1	10.03329	9.2	0.9	5.0	12.5	6.8	43.2	2.51373
2	10.07400	10.0	1.0	5.2	12.9	6.5	55.0	2.58306
3	10.06338	8.6	1.0	4.0	13.2	7.1	53.2	2.44023
4	20.06948	9.4	1.0	4.9	13.1	6.6	104.4	4.61326
5	20.09530	9.4	0.9	6.6	13.0	7.6	98.9	4.80867
6	20.00254	9.6	1.0	5.8	13.3	6.8	107.9	4.70948
7	20.03360	10.3	1.0	6.5	13.5	7.0	109.2	4.82001

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข
**วิธีการคำนวณเกี่ยวกับการออกแบบระบบทำน้ำร้อนจากพลังงาน
 แสงอาทิตย์**

ตารางที่ ข.1 ข้อมูลเกี่ยวกับความเข้มรังสีของแสงอาทิตย์อุณหภูมิอากาศที่ใช้ในการคำนวณ [27]

เวลา (น.)	ความเข้มรังสีของแสงอาทิตย์ (W/m^2)	อุณหภูมิ ($^{\circ}C$)
08:00	261.40	28
09:00	539.18	30
10:00	793.91	30
11:00	959.87	32
12:00	1,107.31	32
13:00	1,135.82	34
14:00	1,072.94	34
15:00	924.10	32
16:00	702.97	32
17:00	433.93	32
18:00	164.45	32
19:00	-	30
20:00	-	30
21:00	-	28
22:00	-	28
23:00-06:00	-	26
07:00	-	28

หมายเหตุ : 1) ความเข้มรังสีของแสงอาทิตย์จากการคำนวณข้อมูลประจำวันที่ 13 เมษายน พ.ศ.2554

2) อุณหภูมิแต่ละช่วงเวลาเป็นการประเมินจากอุณหภูมิเฉลี่ย อุณหภูมิสูงสุดเฉลี่ย และอุณหภูมิต่ำสุดเฉลี่ยในเดือนเมษายน พ.ศ.2554

ข.1 การออกแบบถังพาราฟิน (paraffin storage tank)

จากการออกแบบระบบทำน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีพาราฟินเป็นตัวช่วย มีการกล่าวถึงปริมาณพาราฟินที่เหมาะสมต่อปริมาณน้ำในถังเก็บอยู่ในช่วงร้อยละ 30-36 โดยน้ำหนักน้ำ [28-29] ดังนั้น ปริมาณพาราฟินที่ใช้ คือ 30 kg หรือปริมาตร 0.0333 m^3

กำหนดให้ค่าการขยายตัวเชิงปริมาตรเป็น 12.5% [30] ดังนั้น

$$\text{ปริมาตรถังเก็บพาราฟินที่ต้องการ} = 0.0333 \times 1.125 = 0.0375 \text{ m}^3$$

$$\text{จากการคำนวณเส้นผ่านศูนย์กลางของถังเก็บพาราฟิน} = 0.37 \text{ m}$$

$$\text{ความสูงของถังเก็บมีค่า} = 0.37 \text{ m}$$

$$\text{ปริมาตรถังเก็บพาราฟินจริง} = \pi \times 0.1850^2 \times 0.3700 = 0.0398 \text{ m}^3$$

ข.2 การออกแบบถังเก็บน้ำ (water storage tank)

ต้องการให้ถังเก็บน้ำสามารถเก็บน้ำได้ 0.1 m^3 และมีถังเก็บพาราฟินปริมาตร 0.0398 m^3 ซึ่งบรรจุอยู่ภายในถังเก็บน้ำ

กำหนดให้ค่า safety factor คือ 1.20 ดังนั้น

$$\text{ถังเก็บน้ำมีปริมาตร} = (0.1 + 0.0398) \times 1.2 = 0.1678 \text{ m}^3$$

$$\text{จากการคำนวณเส้นผ่านศูนย์กลางของถังเก็บพาราฟิน} = 0.60 \text{ m}$$

$$\text{ความสูงของถังเก็บมีค่า} = 0.60 \text{ m}$$

ข.3 การคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจากตัวถังเก็บน้ำ

สมมติฐาน พิจารณาทรงกระบอกเป็นการคำนวณในสภาวะคงตัวหนึ่งมิติ

วิธีการคำนวณ

ความต้านทานของการพาความร้อนที่ด้านในถังเก็บน้ำ

$$R_i = \frac{1}{h_i A_i} = \frac{1}{100 \times (\pi \times 0.6 \times 0.6)} = 0.0088 \text{ K/W}$$

ความต้านทานของการนำความร้อนของถังเก็บน้ำ

$$R_i = \frac{\ln(D_o/D_i)}{2\pi kL} = \frac{\ln(0.6005/0.60)}{2 \times \pi \times 16 \times 0.6} = 1.3809 \times 10^{-5} \text{ K/W}$$

ความต้านทานของการพาความร้อนที่ด้านนอกถังเก็บน้ำ

$$R_o = \frac{1}{h_o A_o} = \frac{1}{2.5 \times (\pi \times 0.6005 \times 0.6)} = 0.3534 \text{ K/W}$$

จากผลการคำนวณข้างต้นนำมาคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่พื้นที่ผิวด้านนอกของถัง

$$U_o = \frac{1}{A_o \sum R} = \frac{1}{(\pi \times 0.6005 \times 0.6) \times (0.3622)} = 2.4391 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

ข.4 การคำนวณอุณหภูมิน้ำภายในถังเก็บน้ำที่เวลาต่างๆของวันในถังเก็บน้ำที่ไม่มีถึงบรรจูปาราฟิน

ตารางที่ ข.2 ผลการคำนวณในถังเก็บน้ำที่ไม่มีถึงบรรจูปาราฟิน

เวลา (น.)	I_T (W/m^2)	T_a ($^{\circ}C$)	I_{TC} (W/m^2)	T_{fi} ($^{\circ}C$)	Q_{coll} (W)	T_s ($^{\circ}C$)	$T_s^{t+\Delta t}$ ($^{\circ}C$)
08:00	261.40	28	17.46	30.00	429.96	30.00	32.81
09:00	539.18	30	24.49	32.81	907.18	32.81	38.75
10:00	793.91	30	76.38	38.75	1264.69	38.75	46.95
11:00	989.87	32	130.49	46.95	1514.71	46.95	56.69
12:00	1107.31	32	215.49	56.69	1571.88	56.69	66.63
13:00	1135.82	34	284.79	66.63	1499.99	66.63	75.94
14:00	1072.94	34	366.13	75.94	1245.79	75.94	83.41
15:00	924.10	32	448.78	83.41	837.78	83.41	88.01
16:00	702.97	32	488.93	88.01	377.27	88.01	89.48
17:00	433.93	32	501.77	89.48	-119.57	89.48	87.64
18:00	164.45	32	485.72	87.64	-566.25	87.64	86.63
19:00	0	30	494.31	86.63	-871.25	86.63	85.59
20:00	0	30	485.29	85.59	-855.36	85.59	84.58
21:00	0	28	493.90	84.58	-870.52	84.58	83.55
22:00	0	28	484.88	83.55	-854.64	83.55	82.53
23:00	0	26	493.49	82.53	-869.81	82.53	81.50
24:00	0	26	484.49	81.50	-853.94	81.50	80.49
01:00	0	26	475.65	80.49	-838.36	80.49	79.50
02:00	0	26	466.97	79.50	-823.06	79.50	78.52
03:00	0	26	458.45	78.52	-808.05	78.52	77.56
04:00	0	26	450.09	77.56	-793.30	77.56	76.62
05:00	0	26	441.87	76.62	-778.83	76.62	75.70
06:00	0	26	433.81	75.70	-764.62	75.70	74.79
07:00	0	28	408.44	74.79	-719.89	74.79	73.94

ตัวอย่างการคำนวณ เวลา 08.00 น. กำหนดให้น้ำหนักของน้ำที่ใช้ในการคำนวณ คือ 130 kg

1) คำนวณค่ารังสีอาทิตย์วิกฤติ

$$I_{TC} = \frac{F_R U_L (T_{fi} - T_a)}{F_R (\tau \alpha)_e} = \frac{7.123 \times (30 - 28)}{0.816} = 17.46 \text{ W/m}^2$$

เมื่อเปรียบเทียบกับค่าความเข้มรังสีของแสงอาทิตย์ (I_T) ณ เวลานั้นๆ $I_T > I_{TC}$ ระบบจึงจะสามารถทำงานได้ จากข้อมูลข้างต้น $261.40 > 17.46$ แสดงว่าระบบสามารถทำงานได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) คำนวณอุณหภูมิน้ำภายในถังเก็บหลังเวลาผ่านไป 1 ชั่วโมง ($T_s^{t+\Delta t}$)

$$T_s^{t+\Delta t} = T_s + \frac{\Delta t [A_C [F_R (\tau \alpha)_e I_T - F_R U_L (T_{fi} - T_a)] - (UA)_s (T_s - T_a)]}{(M C_p)_s}$$

$$T_s^{t+\Delta t} = 30 + \frac{3600 \times [2.16 ((0.816 \times 261.40) - 7.123(30 - 28)) - (2.4391 \times 1.1319(30 - 28))]}{130 \times 4190}$$

$$= 30 + 3.6467 = 32.81 \text{ } ^\circ\text{C}$$

ข.5 การคำนวณอุณหภูมิน้ำภายในถังเก็บน้ำที่เวลาต่างๆของวันในถังเก็บน้ำที่มีถึงบรรจุพาราฟิน

ตารางที่ ข.3 ผลการคำนวณในถังเก็บน้ำที่มีถึงบรรจุพาราฟิน

เวลา (น.)	I_T (W/m^2)	T_a ($^\circ\text{C}$)	I_{TC} (W/m^2)	T_{fi} ($^\circ\text{C}$)	Q_{coll} (W)	T_s ($^\circ\text{C}$)	$T_s^{t+\Delta t}$ ($^\circ\text{C}$)
08:00	261.40	28	17.46	30.00	429.96	30.00	33.04
09:00	539.18	30	26.55	33.04	903.54	33.04	39.46
10:00	793.91	30	82.55	39.46	1253.81	39.46	48.26
11:00	989.87	32	141.89	48.26	1494.61	48.26	58.64
12:00	1107.31	32	232.59	58.64	1541.75	58.64	64.40
13:00	1135.82	34	265.37	64.40	1534.23	64.40	64.40
14:00	1072.94	34	265.37	64.40	1423.40	64.40	64.40
15:00	924.10	32	282.83	64.40	1130.29	64.40	64.40
16:00	702.97	32	282.83	64.40	740.53	64.40	65.77
17:00	433.93	32	294.81	65.77	245.21	65.77	66.85
18:00	164.45	32	304.20	66.85	-246.32	66.85	64.42
19:00	0	30	300.49	64.42	-529.63	64.42	64.40
20:00	0	30	300.28	64.40	-529.27	64.40	64.40
21:00	0	28	317.74	64.40	-560.04	64.40	64.40
22:00	0	28	317.74	64.40	-560.04	64.40	64.40
23:00	0	26	335.20	64.40	-590.81	64.40	64.40
24:00	0	26	335.20	64.40	-590.81	64.40	64.40
01:00	0	26	335.20	64.40	-590.81	64.40	64.40
02:00	0	26	335.20	64.40	-590.81	64.40	61.53
03:00	0	26	310.11	61.53	-546.59	61.53	59.03
04:00	0	26	288.29	59.03	-508.13	59.03	56.85
05:00	0	26	269.30	56.85	-474.66	56.85	54.96
06:00	0	26	252.79	54.96	-445.55	54.96	53.31
07:00	0	28	220.96	53.31	-389.45	53.31	52.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการคำนวณอุณหภูมิน้ำภายในถังเก็บน้ำที่เวลาต่างๆของวัน เมื่อภายในถังเก็บประกอบด้วยน้ำและถังเก็บพาราฟิน สามารถแบ่งการคำนวณได้เป็น 5 ช่วง ได้แก่ ช่วงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของพาราฟินในสถานะของแข็ง ช่วงการเปลี่ยนสถานะของพาราฟินจากของแข็งไปเป็นของเหลว ช่วงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของพาราฟินในสถานะของเหลว ช่วงการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวกลับมาเป็นของแข็ง และช่วงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของพาราฟินในสถานะของเหลว

1) ช่วงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของพาราฟินในสถานะของแข็ง (08.00-11.00 น.)

จากสมดุลพลังงาน (energy balance)

$$Q_{\text{coll}} = A_C [F_R(\tau\alpha)_e I_T - F_R U_L (T_f - T_a)] = M_w c_{pw} \frac{(T_s^{t+\Delta t} - T_s)}{\Delta t} + (UA)_s (T_s - T_a) + M_p c_{pp,s} \frac{(T_s^{t+\Delta t} - T_s)}{\Delta t}$$

ตัวอย่างการคำนวณ ที่เวลา 08.00 น.

คำนวณอุณหภูมิน้ำภายในถังเก็บหลังเวลาผ่านไป 1 ชั่วโมง ($T_s^{t+\Delta t}$)

$$T_s^{t+\Delta t} = T_s + \frac{\Delta t \times \{A_C [F_R(\tau\alpha)_e I_T - F_R U_L (T_f - T_a)] - (UA)_s (T_s - T_a)\}}{M_w c_{pw} + M_p c_{pp}}$$

$$T_s^{t+\Delta t} = 30 + \frac{3600 \times \{2.16 [(0.816 \times 261.40) - 7.123(30 - 28)] - [2.4391 \times 1.1319(30 - 28)]\}}{(100 \times 4190) + (30 \times 2777.78)}$$

$$= 30 + 3.0418 = 33.0418 \text{ } ^\circ\text{C}$$

2) ช่วงการเปลี่ยนสถานะของพาราฟินจากของแข็งไปเป็นของเหลว (12.00-15.00 น.)

เวลา 12.00 น.

ก่อนที่พาราฟินจะมีการเปลี่ยนสถานะ ต้องมีอุณหภูมิถึงจุดหลอมเหลวก่อน ซึ่งเท่ากับ $64.40 \text{ } ^\circ\text{C}$ โดย T_s เท่ากับ $58.6448 \text{ } ^\circ\text{C}$

$$Q_{\text{coll}} = A_C [F_R(\tau\alpha)_e I_T - F_R U_L (T_f - T_a)]$$

$$= M_w c_{pw} \frac{(T_s^{t+\Delta t} - T_s)}{\Delta t} + (UA)_s (T_s - T_a) + M_p c_{pp,s} \frac{(T_s^{t+\Delta t} - T_s)}{\Delta t} + M_{p,a} L_p$$

โดย $M_{p,a}$ คือ น้ำหนักของพาราฟินที่หลอมเหลว (kg)

$$Q_{\text{coll}} = (M_w c_{pw} + M_p c_{pp,s}) \frac{(T_s^{t+\Delta t} - T_s)}{\Delta t} + (UA)_s (T_s - T_a) + M_{p,a} L_p$$

$$1541.7515 = [(100 \times 4190) + (30 \times 2777.78)] \frac{(64.40 - 58.6448)}{3600} + [2.4391 \times 1.1319 (58.6448 - 32)]$$

$$+ M_{p,a} (165.10)$$

เพราะฉะนั้น $M_{p,a} = 4.0287 \text{ kg}$

เวลา 13.00-15.00 น.

พาราฟินจะมีการเปลี่ยนสถานะ โดยอุณหภูมิคงที่เท่ากับ $64.40 \text{ }^\circ\text{C}$

$M_{p,a} = 27.2305 \text{ kg}$ เหลืออีก 2.7695 kg

เวลา 16.00 น.

พาราฟินจะเปลี่ยนสถานะเป็นของเหลวและมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิพาราฟินในสถานะของเหลว

$$Q_{\text{coll}} = A_c [F_R (\tau \alpha)_e I_T - F_R U_L (T_f - T_a)]$$

$$= M_w c_{pw} \frac{(T_s^{t+\Delta t} - T_s)}{\Delta t} + (UA)_s (T_s - T_a) + M_p c_{pp,l} \frac{(T_s^{t+\Delta t} - T_s)}{\Delta t} + M_{p,a} L_p$$

$$740.5308 = [(100 \times 4190) + (30 \times 2980)] \frac{(T_s^{t+\Delta t} - 64.40)}{3600} + [2.4391 \times 1.1319 (64.40 - 32)]$$

$$+ [2.7695 \times 165.10]$$

$$T_s^{t+\Delta t} = 64.40 + \frac{3600 \times \{ [740.5308] - [2.4391 \times 1.1319 (64.40 - 32)] - [2.7695 \times 165.10] \}}{(100 \times 4190) + (30 \times 2980)}$$

$$= 64.40 + 1.3756 = 65.7726 \text{ }^\circ\text{C}$$

3) ช่วงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของพาราฟินในสถานะของเหลว (17.00-18.00 น.)

สมดุลพลังงาน (energy balance)

$$Q_{\text{coll}} = A_c [F_R (\tau \alpha)_e I_T - F_R U_L (T_f - T_a)] = M_w c_{pw} \frac{(T_s^{t+\Delta t} - T_s)}{\Delta t} + (UA)_s (T_s - T_a) + M_p c_{pp,l} \frac{(T_s^{t+\Delta t} - T_s)}{\Delta t}$$

ตัวอย่างการคำนวณ ที่เวลา 17.00 น.

คำนวณอุณหภูมิในถังเก็บหลังเวลาผ่านไป 1 ชั่วโมง ($T_s^{t+\Delta t}$)

$$T_s^{t+\Delta t} = T_s + \frac{\Delta t \times \{ Q_{\text{coll}} - (UA)_s (T_s - T_a) \}}{M_w c_{pw} + M_p c_{pp,l}}$$

$$T_s^{t+\Delta t} = 66.8487 + \frac{3600 \times \{ (-246.3180) - [2.4391 \times 1.1319 (66.8487 - 32)] \}}{(100 \times 4190) + (30 \times 2980)}$$

$$= 66.8487 - 2.4255 = 64.4232 \text{ }^\circ\text{C}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4) ช่วงการเปลี่ยนสถานะของพาราฟินจากของเหลวไปเป็นของแข็ง (19.00-02.00 น.)

เวลา 19.00 น.

ก่อนที่พาราฟินจะมีการเปลี่ยนสถานะเป็นของแข็ง ต้องมีอุณหภูมิถึงจุดหลอมเหลวก่อน ซึ่งเท่ากับ $64.40\text{ }^{\circ}\text{C}$ โดย T_s เท่ากับ $64.4323\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$Q_{\text{coll}} = A_C [F_R(\tau\alpha)_e I_T - F_R U_L (T_f - T_a)]$$

$$= M_w c_{pw} \frac{(T_s^{t+\Delta t} - T_s)}{\Delta t} + (UA)_s (T_s - T_a) + M_p c_{pp,l} \frac{(T_s^{t+\Delta t} - T_s)}{\Delta t} + M_{p,b} L_p$$

โดย $M_{p,b}$ คือ น้ำหนักของพาราฟินที่เกิดการแข็งตัว (kg)

$$Q_{\text{coll}} = (M_w c_{pw} + M_p c_{pp,l}) \frac{(T_s^{t+\Delta t} - T_s)}{\Delta t} + (UA)_s (T_s - T_a) + M_{p,b} L_p$$

$$-529.6250 = [(100 \times 4190) + (30 \times 2980)] \frac{(64.40 - 64.4323)}{3600} + [2.4391 \times 1.1319 (64.4323 - 30)]$$

$$- M_{p,a} (165.10)$$

เพราะฉะนั้น $M_{p,a} = 3.7639\text{ kg}$

เวลา 20.00-01.00 น.

พาราฟินจะมีการเปลี่ยนสถานะเป็นของแข็ง โดยที่อุณหภูมิจะคงที่เท่ากับ $64.40\text{ }^{\circ}\text{C}$

$M_{p,a} = 28.2083\text{ kg}$ เหลืออีก 1.7917 kg

เวลา 02.00 น.

พาราฟินจะเปลี่ยนสถานะเป็นของแข็งทั้งหมดและมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิพาราฟินในสถานะของแข็ง

$$Q_{\text{coll}} = A_C [F_R(\tau\alpha)_e I_T - F_R U_L (T_f - T_a)]$$

$$= M_w c_{pw} \frac{(T_s^{t+\Delta t} - T_s)}{\Delta t} + (UA)_s (T_s - T_a) + M_p c_{pp,s} \frac{(T_s^{t+\Delta t} - T_s)}{\Delta t} - M_{p,a} L_p$$

$$-590.8101 = [(100 \times 4190) + (30 \times 2980)] \frac{(T_s^{t+\Delta t} - 64.40)}{3600} + [2.4391 \times 1.1319 (64.40 - 26)]$$

$$- [1.7917 \times 165.10]$$

$$T_s^{t+\Delta t} = 64.40 + \frac{3600 \times \{-590.8101 - [2.4391 \times 1.1319 (64.40 - 26)] + [1.7917 \times 165.10]\}}{(100 \times 4190) + (30 \times 2777.78)}$$

$$= 64.40 - 2.8739 = 61.5261\text{ }^{\circ}\text{C}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5) ช่วงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของพาราฟินในสถานะของแข็ง (03.00-07.00 น.)

สมดุลพลังงาน (energy balance)

$$Q_{\text{coll}} = A_C [F_R(\tau\alpha)_e I_T - F_R U_L (T_f - T_a)] = M_w c_{pw} \frac{(T_s^{t+\Delta t} - T_s)}{\Delta t} + (UA)_s (T_s - T_a) + M_p c_{pp,s} \frac{(T_s^{t+\Delta t} - T_s)}{\Delta t}$$

ตัวอย่างการคำนวณ 03.00 น.

คำนวณอุณหภูมิน้ำภายในถังเก็บหลังเวลาผ่านไป 1 ชั่วโมง ($T_s^{t+\Delta t}$)

$$T_s^{t+\Delta t} = T_s + \frac{\Delta t \times \{ [A_C [F_R(\tau\alpha)_e I_T - F_R U_L (T_f - T_a)] - (UA)_s (T_s - T_a) \}}{M_w c_{pw} + M_p c_{pp,s}}$$

$$T_s^{t+\Delta t} = 61.5261 + \frac{3600 \times \{ [2.16 \{ [0.816 \times 261.40] - 7.123(30-28) \}] - [2.4391 \times 1.1319(30-28)] \}}{(100 \times 4190) + (30 \times 2777.78)}$$

$$= 61.5261 + 3.0418 = 33.0418 \text{ } ^\circ\text{C}$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

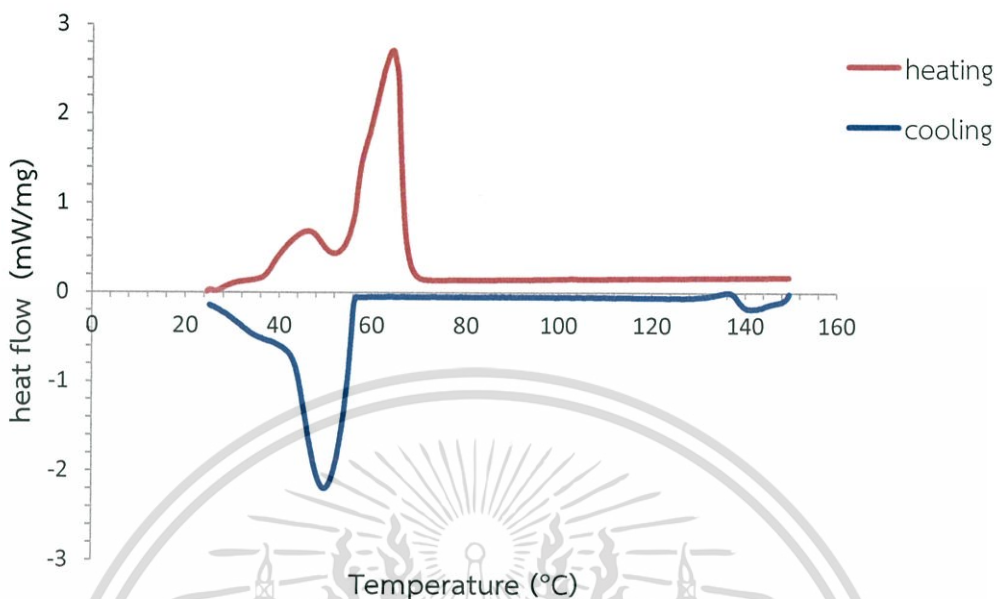
ภาคผนวก ค
ข้อมูลการวิเคราะห์ผล

ตารางที่ ค.1 ผลการวิเคราะห์วัสดุที่เก็บความร้อนด้วยเทคนิค TCA

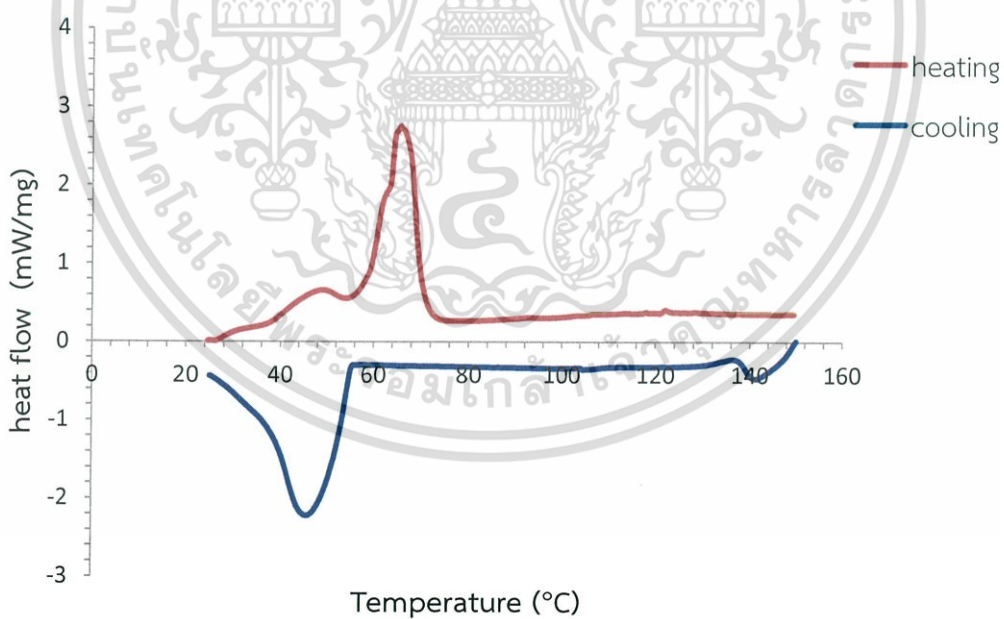
Samples	Condition Used		Thermal Properties	Measurement Results	Average	S.D.
	Output of Powder (W)	Measuring Time (s)				
1. Paraffin	0.08	120	Thermal Conductivity (W/m K)	0.2814	0.2808	0.0017
				0.2788		
				0.2821		
			Thermal Diffusivity (mm ² /s)	0.1259	0.1251	0.0016
				0.1232		
				0.1261		
Specific Heat (MJ/m ³ K)	2.2340	2.2450	0.0165			
	2.2640					
	2.2370					
2. Paraffin + RHA	0.08	120	Thermal Conductivity (W/m K)	0.2273	0.2276	0.0017
				0.2294		
				0.2261		
			Thermal Diffusivity (mm ² /s)	0.1268	0.1274	0.0013
				0.1289		
				0.1265		
Specific Heat (MJ/m ³ K)	1.7930	1.7870	0.0066			
	1.7800					
	1.7880					
3. Paraffin + Silica	0.08	120	Thermal Conductivity (W/m K)	0.2358	0.2329	0.0025
				0.2313		
				0.2316		
			Thermal Diffusivity (mm ² /s)	0.1164	0.1118	0.0040
				0.1099		
				0.1092		
Specific Heat (MJ/m ³ K)	2.0260	2.0837	0.0505			
	2.1050					
	2.1200					

หมายเหตุ: 1) Thermal Conductivity มีความผันแปรของการวัด (reproducibility) $\pm 2\%$
 2) Thermal Diffusivity มีความผันแปรของการวัด (reproducibility) $\pm 5\%$
 3) Specific Heat มีความผันแปรของการวัด (reproducibility) $\pm 7\%$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

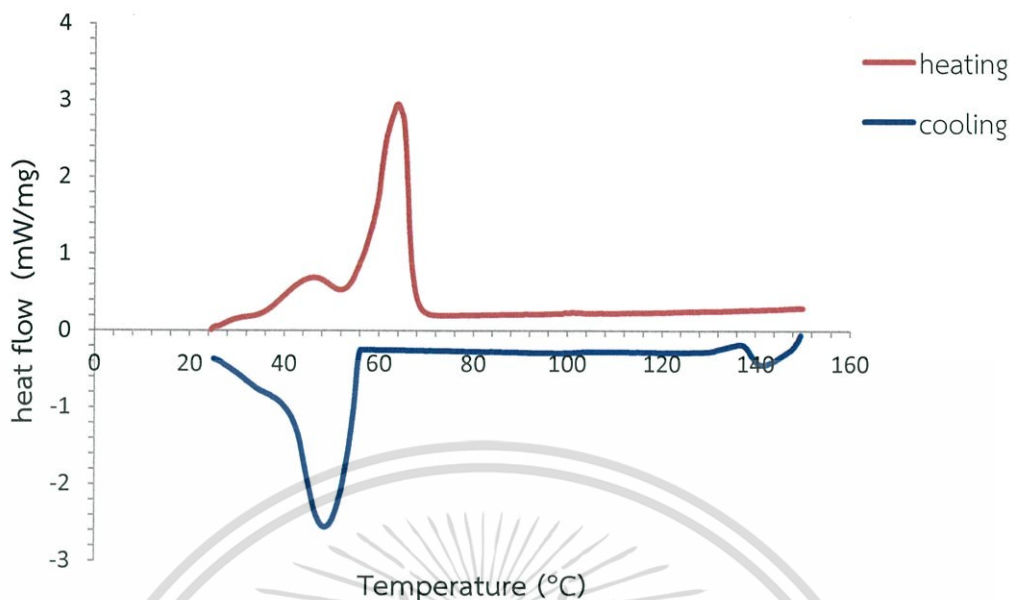


รูปที่ ค.1 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC ของพาราฟิน



รูปที่ ค.2 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC ของพาราฟินที่ผ่านการเติมแก้วกลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

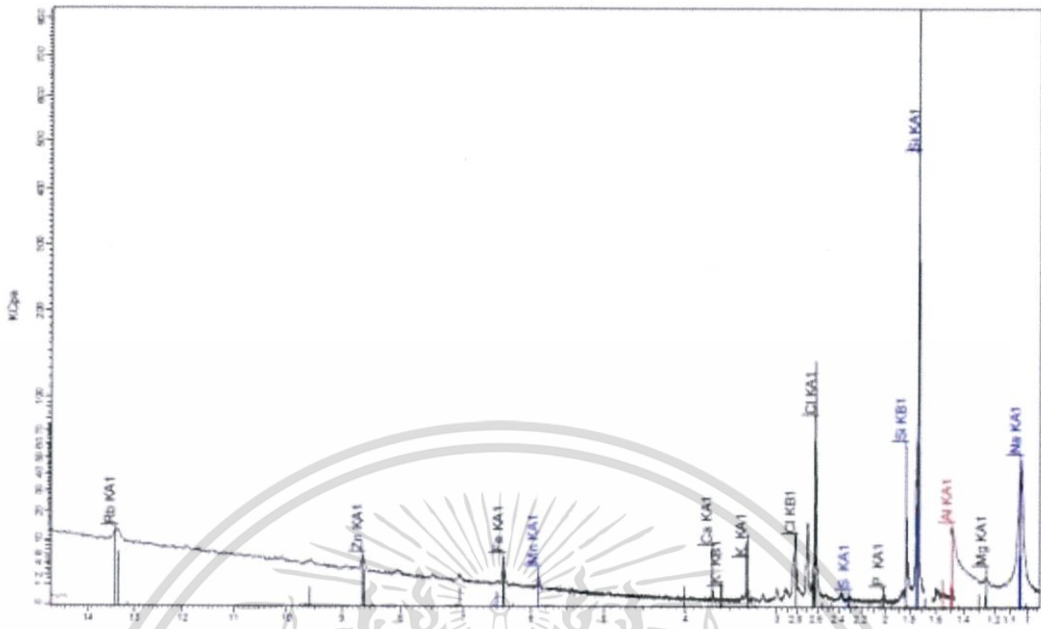


รูปที่ ค.3 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC ของพาราฟินที่ผ่านการเติมซิลิกา

ตารางที่ ค.2 ผลการวิเคราะห์ชนิดและปริมาณสารประกอบในแก้วเคลือบ

Composition	Amount
SiO ₂	79.3 %
K ₂ O	2.51 %
P ₂ O	1.25 %
CaO	0.736 %
Cl	0.548 %
Al ₂ O ₃	0.536 %
MgO	0.501 %
Fe ₂ O ₃	0.466 %
SO ₃	0.180 %
MnO	0.133 %
Na ₂ O	468 ppm
Cr ₂ O ₃	359 ppm
TiO ₂	268 ppm
ZnO	174 ppm
Rb ₂ O	114 ppm
Br	36.3 ppm
CuO	35.7 ppm
SrO	24.0 ppm
NiO	20.5 ppm
ZrO ₂	10.8 ppm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค.4 ผลการวิเคราะห์ชนิดและปริมาณสารประกอบในแก้วเคลือบ

ตารางที่ ค.3 ผลการวิเคราะห์ชนิดและปริมาณสารประกอบในซิลิกา

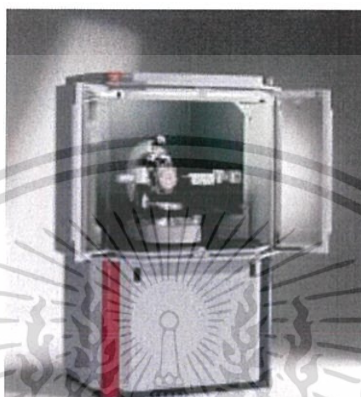
Composition	Amount
SiO ₂	82.7 %
Na ₂ O	7.82 %
Cl	7.45 %
K ₂ O	0.583 %
Al ₂ O ₃	0.294 %
P ₂ O	0.115 %
MgO	445 ppm
CaO	374 ppm
Fe ₂ O ₃	360 ppm
SO ₃	173 ppm
MnO	133 ppm
ZnO	69.6 ppm
Rb ₂ O	26.9 ppm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

ง.1 เครื่องมือวิเคราะห์โครงสร้างผลึกสารตัวอย่าง ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (x-ray diffractometer, XRD) [31,32]



รูปที่ ง.1 เครื่อง XRD [33]

ข้อมูลทั่วไป

เครื่องวิเคราะห์สารด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (x-ray diffractometer, XRD) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้าง มีการนำมาใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์วัสดุที่มีสูตรโครงสร้างทางเคมีเหมือนกันแต่มีโครงสร้างผลึกต่างกันผลึก เป็นที่นิยมในงานด้านเคมีและเคมีชีวภาพ เพราะสามารถตรวจโครงสร้างของวัสดุได้หลากหลาย เช่น สารประกอบอินทรีย์ ดีเอ็นเอ โปรตีนที่มีอยู่ตามธรรมชาติ วัสดุที่สังเคราะห์ขึ้น เป็นต้น

หลักการทำงาน

เนื่องจากสารประกอบแต่ละชนิดจะมีรูปแบบโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกัน ส่วนระยะห่างระหว่างระนาบของอะตอมที่จัดเรียงกันอย่างเป็นระเบียบก็แตกต่างกันด้วย ขึ้นอยู่กับขนาดและประจุของอะตอม ทำให้สารประกอบแต่ละชนิดจะมีรูปแบบ (XRD pattern) เฉพาะตัวเช่นเดียวกัน

เครื่องวิเคราะห์สารด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์อาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ โดยรังสีเอ็กซ์จะเลี้ยวเบนไปตามช่องว่างระหว่างอะตอมภายในผลึก แล้วทำการวิเคราะห์ธรรมชาติของโครงสร้างผลึกนั้นๆ โคนระยะห่างระหว่างอะตอมนั้นสามารถคำนวณได้จากสมการของ Bragg's law

$$n\lambda = 2d \sin \theta$$

โดย

n	คือ	ค่าความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ ($n=1,2,3,\dots$)
d	คือ	ระยะห่างระหว่างระนาบผลึก
θ	คือ	มุมตกกระทบของรังสีเอ็กซ์และระนาบผลึก

การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์สามารถใช้ในการวิเคราะห์ทดสอบชนิดปริมาณคุณภาพของสารประกอบแบบผลึกต่างๆในชิ้นงานได้ โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เมื่อลำรังสีตกกระทบวัตถุหรืออนุภาคจะเกิดการหักเหของลำรังสีสะท้อนออกมาทำมุมกับระนาบของอนุภาคเท่ากับมุมของลำรังสีตกกระทบดังรูป



รูปที่ ง.2 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ในผลึก [31]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ง.2 เครื่องมือวิเคราะห์ชนิดของธาตุและปริมาณธาตุในสารตัวอย่าง ด้วยเทคนิค เอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (x-ray fluorescence, XRF) [34,35]



รูปที่ ง.3 เครื่อง XRF [34]

ข้อมูลทั่วไป

เครื่องเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ชนิดของธาตุและปริมาณธาตุในสารตัวอย่าง โดยอาศัยหลักการที่อิเล็กตรอนในวงโคจรของอะตอม เปลี่ยนระดับชั้นที่มีพลังงานสูงไปยังชั้นที่มีพลังงานต่ำกว่า และคายพลังงานออกมาในรูปของรังสีเอกซ์ที่มีพลังงานจำเพาะ (characteristic x-ray) ของแต่ละธาตุ ส่วนการประยุกต์การใช้งานสามารถหาปริมาณธาตุด้านวัสดุที่เป็นแม่เหล็กหรืออิเล็กทริกส์ เช่น วัสดุเซมิคอนดักเตอร์ แบตเตอรี่ คอนเดนเซอร์ ได้ งานด้านอุตสาหกรรมเคมี เช่น วิเคราะห์สี สีย้อม ยาง เครื่องสำอาง งานอุตสาหกรรมด้านปิโตรเลียม เช่น น้ำมันหล่อลื่น โพลีเมอร์ งานอุตสาหกรรมด้านเซรามิกส์ เช่น ซีเมนต์ ดิน แก้ว หิน งานอุตสาหกรรมด้านโลหะและอโลหะ งานด้านสิ่งแวดล้อม เช่น น้ำเสียโรงงาน น้ำทะเล แม่น้ำ งานอุตสาหกรรมด้านการเกษตรและอาหาร งานอุตสาหกรรมกระดาษ เป็นต้น

หลักการทำงาน

เมื่อรังสีเอ็กซ์ปฐมภูมิ (primary x-ray photon) จากแหล่งกำเนิดรังสีพุ่งเข้าชนวัตถุต่างๆ จะส่งผลให้อิเล็กตรอนวงในสุด (K-shell) ของอะตอมภายในวัตถุนั้นหลุดออกจากอะตอมในรูปของโฟโตอิเล็กตรอน (photoelectron) ทำให้เกิดช่องว่างชั้นในวงอิเล็กตรอนนั้นดังแสดงในรูปที่ ค.3 ซึ่งที่สถานะนี้อะตอมจะไม่เสถียร และอะตอมจะกลับสู่สถานะที่เสถียรขึ้น โดยการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนวงนอกเข้ามาแทนที่ช่องว่างดังกล่าว ซึ่งในการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอน โดยจะมีการปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า เรียกว่า รังสีเอ็กซ์เฉพาะตัว (characteristic - x) ซึ่งพลังงานของรังสีเอ็กซ์ที่ปลดปล่อยออกมานั้นจะมีค่าแตกต่างกันขึ้นกับความแตกต่างของระดับพลังงานเริ่มต้นของอิเล็กตรอน ข้อมูลนี้จึงสามารถนำมาวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุ และธาตุองค์ประกอบในสารตัวอย่างได้

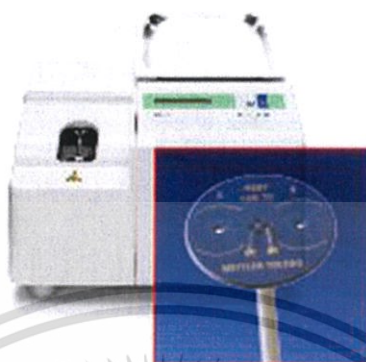
โดยเมื่อมีการปลดปล่อยพลังงานออกมา ซึ่งพลังงานนั้นจะสะท้อนกลับมายังชุด detector ที่อยู่ในตัวเครื่องมือซึ่งจะตรวจวัดพลังงานที่สะท้อนกลับมา จากนั้นจะถูกส่งต่อไปยังชุด digital signal processor ซึ่งจะทำการแปลงสัญญาณให้อยู่ในรูปแบบของข้อมูลดิจิทัลเพื่อส่งให้กับ CPU ทำการประมวลผลออกมา จากนั้นแสดงผ่านทางหน้าจอแสดงผล และเก็บข้อมูลดังกล่าวไว้ในหน่วยความจำภายในเครื่องมือ



รูปที่ ๑.๔ หลักการทำงานของเครื่อง XRF [35]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ง.3 เครื่องมือวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของสาร (differential scanning calorimetry, DSC) [36]



รูปที่ ง.5 เครื่อง DSC [36]

ข้อมูลทั่วไป

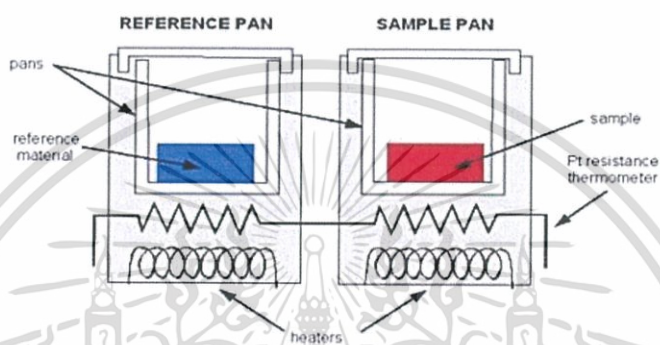
เครื่องมือวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของสาร หรือ DSC เป็นเครื่องมือวิเคราะห์ที่ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย ตั้งแต่ในอุตสาหกรรมเคมี พลาสติก อิเล็กทรอนิกส์ ยานยนต์ ไปจนถึงอาหารและยา โดยถูกนำไปประยุกต์ใช้ทั้งสำหรับการวิเคราะห์คุณภาพผลิตภัณฑ์ และงานวิจัย เป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์ทดสอบวัสดุโดยการวัดค่าพลังงานความร้อนและอุณหภูมิของสารตัวอย่างเปรียบเทียบกับสารมาตรฐานเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ หรือการเปลี่ยนแปลงทางเคมี ตัวอย่างของข้อมูลที่สามารถวิเคราะห์ออกมาได้ เช่น จุดหลอมเหลว (melting point) อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature, T_g) ความเสถียรต่อปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation stability) จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยา (reaction kinetics) และความบริสุทธิ์ (purity)

หลักการทํางาน

หลักพื้นฐานของ DSC คือ นำถาด 2 ถาด ถาดแรกเป็นถาดที่บรรจุสารตัวอย่าง (sample pan) ส่วนถาดที่สองเป็นถาดอ้างอิง (reference pan) ซึ่งเป็นถาดเปล่าไปวางอยู่บนอุปกรณ์ให้ความร้อน (furnace) ซึ่งเป็นชนิดเดียวกันและวางอยู่ข้าง ๆ กัน เมื่อเริ่มการทดสอบอุปกรณ์ให้ความร้อนจะเริ่มให้ความร้อนแก่ถาดทั้งสอง โดยเครื่อง DSC จะควบคุมอัตราการเพิ่มอุณหภูมิให้คงที่ แต่ที่สำคัญที่สุด คือ จะควบคุมให้อุปกรณ์ให้ความร้อนทั้งสองเพิ่มอุณหภูมิถาดทั้งสองที่วางแยกกัน ด้วยอัตราการเพิ่มความร้อนที่เท่ากันตลอดทั้งการทดสอบ ซึ่งสาเหตุที่ความร้อนของถาดทั้งสองจะเพิ่มด้วยอัตราที่ไม่เท่ากัน นั่นคือ ถาดที่บรรจุสารตัวอย่างมีตัวอย่างอยู่ข้างใน แต่ถาดอ้างอิงไม่มีสารใดอยู่ภายในเลย การมีสารตัวอย่างอยู่ข้างในทำให้ถาดที่บรรจุสารตัวอย่างมีตัวอย่างมีสารในปริมาณที่มากกว่าถาดอ้างอิง หมายความว่าอุปกรณ์ให้ความร้อนต้องให้ความร้อนแก่ถาดที่บรรจุสารตัวอย่างมากกว่าที่ให้ถาดอ้างอิง เพื่อที่จะคงอัตราการเพิ่มอุณหภูมิให้เท่ากัน ดังนั้นอุปกรณ์ให้ความร้อนที่อยู่ใต้ถาดที่บรรจุสารตัวอย่างจะต้องทำงานหนักกว่าอุปกรณ์ให้ความร้อนที่อยู่ใต้ถาดอ้างอิง และการวัดความแตกต่างของปริมาณความร้อนจากอุปกรณ์ให้ความร้อนทั้งสองนี้ก็คือหน้าที่หลักของเครื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความร้อนที่ไหลสารตัวอย่าง (heat flow) มีค่าสอดคล้องกับพลังงานที่ไหลสารตัวอย่าง และถูกวัดในหน่วยมิลลิวัตต์ (mW) เมื่อนำค่าพลังงานมาคูณด้วยเวลา ผลลัพธ์ที่ได้คือปริมาณพลังงานที่ถูกแสดงในหน่วย มิลลิวัตต์วินาที (mW s) หรือ มิลลิจูลล์ (mJ) พลังงานที่ไหลสารตัวอย่างมีค่าสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปี (enthalpy) ของสารตัวอย่าง เมื่อสารตัวอย่างดูดพลังงาน เรียกว่า enthalpy มีการเปลี่ยนแปลงแบบ endothermic และเมื่อสารตัวอย่างคายพลังงาน เรียกว่า enthalpy มีการเปลี่ยนแปลงแบบ exothermic



รูปที่ ง.6 หลักการของเครื่อง DSC [36]

การทดสอบสารตัวอย่างจะทำได้โดยการเพิ่มหรือลดอุณหภูมิสารตัวอย่างด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิที่คงที่ หรือการรักษาอุณหภูมิสารตัวอย่างไว้คงที่ (isothermal) เป็นระยะเวลาหนึ่ง และสำหรับการทดสอบส่วนใหญ่ บรรยากาศจะมีบทบาทสำคัญต่อผลการทดสอบเช่นเดียวกับอุณหภูมิ และอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ โดยส่วนใหญ่แล้วบรรยากาศที่ใช้ในการทดสอบมีสองแบบ คือ บรรยากาศเฉื่อย (inert atmosphere) เช่น ก๊าซไนโตรเจน เป็นจัน และบรรยากาศที่มีก๊าซออกซิเจน (oxidizing atmosphere) ได้แก่ ก๊าซออกซิเจน หรืออากาศ

ง.4 เครื่องวัดสภาพการนำความร้อน Thermal Conductivity Analysis (Hot Disk TCA) [37]



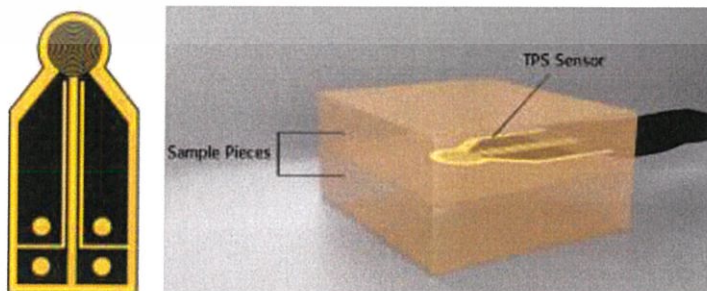
รูปที่ ง.7 เครื่อง Hot Disk TCA [37]

ข้อมูลทั่วไป

สามารถวิเคราะห์วัสดุทดสอบได้ทั้งค่าสภาพการนำความร้อน ค่าความจุความร้อน และค่าความสามารถในการแพร่ของความร้อน โดยสามารถวัดค่าสภาพการนำความร้อนได้ในช่วงระหว่าง 0.005 W/m K ถึง 500 W/m K วัสดุที่นำมาทดสอบสามารถเป็นได้หลายชนิด และสามารถตรวจวิเคราะห์วัสดุทดสอบได้ทั้งของเหลวและของแข็ง ซึ่งวัสดุที่นำมาทดสอบควรเป็นสารเนื้อเดียวกัน

หลักการทำงาน

ในการวิเคราะห์ค่าสภาพการนำความร้อนจะใช้เทคนิคการวัดแบบสถานะไม่คงที่ (transient techniques) โดยภายในเครื่องจะมี disk sensor อยู่ตรงกลางระหว่างชิ้นงานทดสอบสองชิ้น หลังจากนั้นระบบจะให้ความร้อนด้วยกระแสไฟฟ้าคงที่เป็นระยะเวลาสั้น ๆ ความร้อนที่เกิดขึ้นจะกระจายตัวจาก disk sensor ไปยังโดยรอบของชิ้นงานทดสอบที่อยู่ระหว่าง disk sensor ซึ่งความร้อนจะค่อยๆลดลงเมื่อไปถึงชิ้นงานทดสอบทั้งสองชิ้น โดยอัตราการลดลงของความร้อนที่ถ่ายเทไปยังวัสดุทดสอบจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติการถ่ายเทความร้อนของวัสดุนั้นๆ จากนั้นเครื่องจะบันทึกผลอยู่ในรูปความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลา ซึ่งจากความสัมพันธ์ดังกล่าวจะนำไปสู่การคำนวณหาค่าสภาพการนำความร้อน ค่าความจุความร้อน และค่าความสามารถในการแพร่ของความร้อน



รูปที่ ง.8 การทำงานเครื่อง Hot Disk TCA [38]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้