

วัสดุักเก็บความร้อนจากเกลือไนเตรทหลอมเหลวในรูปพุนของซิลิกา  
จากซีเมนต์แกลบและน้ำตาลอินเวิร์ต



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2559

วัสดุักเก็บความร้อนจากเกลือไนเตรทหลอมเหลวในรูปพรุนของซิลิกา  
จากซีเถ้าแกลบและน้ำตาลอินเวิร์ต



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TERNARY NITRATE SALTS IN POROUS SILICA FROM RICE HUSK ASH AND  
INVERTED SUGAR FOR THERMAL ENERGY STORAGE



A REPORT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS  
FOR THE DEGREE OF BACHELOR IN CHEMICAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC YEAR 2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์เรื่อง วัสดุักเก็บความร้อนจากเกลือไนเตรดหลอมเหลวในรูปของซิลิกาจาก  
ซีเถ้าแกลบและน้ำตาลอินเวิร์ต  
โดย นางสาวจินต์จุฑา ขาวเขียว  
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร. อภินันท์ นัมคณิสสรณ์  
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม รศ.ดร. ประกอบ กิจไชยา  
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปริญญาานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญาานิพนธ์



.....ประธานกรรมการ  
(ผศ.ดร.อภินันท์ นัมคณิสสรณ์)



.....กรรมการ  
(อาจารย์บุญชัย โชติวิริยวานิชย์)



.....กรรมการ  
(ดร.วิจิตรา วงศ์พร้อมรัตน์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง	วัสดุักเก็บความร้อนจากเกลือไนเตรทหลอมเหลวในรูปพูนของซิลิกาจากซีเมนต์และน้ำตาลอินเวิร์ต
โดย	นางสาวจินต์จุฑา ขาวเธียร
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
ปีการศึกษา	2559
อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์	ผศ.ดร. อภินันท์ นัมคณิสร์ณ
อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์ร่วม	รศ.ดร. ประกอบ กิจไชยา

### บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้ศึกษาวัสดุเปลี่ยนวัฏภาคเพื่อใช้เป็นตัวกลางในการกักเก็บความร้อนและถ่ายโอนความร้อนของระบบจัดเก็บพลังงานความร้อน โดยศึกษาเกลือไนเตรทหลอมเหลว 3 องค์ประกอบที่จุดยูเทคติกซึ่งประกอบด้วยแคลเซียมไนเตรท โซเดียมไนเตรทและโพแทสเซียมไนเตรทที่สัดส่วนร้อยละ 36, 16 และ 48 โดยมวลตามลำดับ เกลือไนเตรทหลอมเหลวมีช่วงการเปลี่ยนแปลงวัฏภาคกว้าง อยู่ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 150-240 องศาเซลเซียส มีค่าเสถียรทางความร้อนดีและกักเก็บพลังงานได้สูง แต่ข้อเสียคือทำให้เกิดการกัดกร่อน จึงนำเกลือมาบรรจุลงในรูปพูนของซิลิกาจากซีเมนต์เพื่อป้องกันไม่ให้เกลือสัมผัสกับระบบโดยตรง แต่เนื่องจากการบรรจุเกลือไนเตรทหลอมเหลวสามารถบรรจุในซิลิกาได้เพียงร้อยละ 30 โดยมวล จึงไม่เหมาะที่จะนำมาพัฒนาเป็นตัวกลางในการกักเก็บความร้อน เพราะเหตุนี้จึงศึกษาตัวกลางที่ใช้ น้ำตาลอินเวิร์ตแทน เนื่องจากเป็นวัสดุเปลี่ยนวัฏภาคที่มีค่าพลังงานในการเปลี่ยนวัฏภาคสูงและเป็นพลังงานสะอาดไม่เกิดสารพิษ น้ำตาลอินเวิร์ตเกิดจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสน้ำตาลด้วยกรดซัลฟิวริก ซึ่งประกอบด้วยกลูโคสและฟรักโตสที่สัดส่วนโดยโมลเท่ากัน (50:50 %) วิเคราะห์สัดส่วนของน้ำตาลอินเวิร์ตที่เกิดขึ้นด้วยเครื่องโครมาโทกราฟีเหลวสมรรถนะสูง (HPLC) วิเคราะห์ค่าพลังงานความร้อนของการเปลี่ยนวัฏภาคด้วยเครื่องดีพีเพอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (DSC) และวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

Thesis	TERNARY NITRATE SALTS IN POROUS SILICA FROM RICE HUSK ASH AND INVERTED SUGAR FOR THERMAL ENERGY STORAGE
By	Ms. Jinjuta Kaowtain
Degree	Bachelor of Chemical Engineering
Program	Chemical Engineering
Year	2016
Advisor	Asst. Prof. Dr. Apinan Namkanisorn
Co-Advisor	Assoc. Prof. Dr. Prakob Kitchaiya

## ABSTRACT

This project aims to study phase change material for the application of energy storage and heat transfer medium of thermal energy storage. Eutectic mixture of ternary molten salt of 36 wt. %  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  – 16 wt. %  $\text{NaNO}_3$  – 48 wt. %  $\text{KNO}_3$  was initially studied due to its large melting temperature range (150 - 240°C), stability at high temperatures and high storage heat capacity. However, it suffers from high corrosiveness. Therefore, the attempt was made to load this ternary salt into porous silica from rice husk ash to prevent corrosion in the system. The preliminary result showed that only 30 wt. % of ternary nitrate salts can be loaded into porous silica. Thus, it is not a good candidate to be further developed into a medium for energy storage. We, therefore, turned to another system of inverted sugar for the phase change material. This system has high phase change enthalpy values and non-toxic. Inverted sugar was synthesized from the hydrolysis reaction of sugar by sulfuric acid. They consist of glucose and fructose in an equimolar proportion. The fraction of inverted sugar was characterized by High Performance Liquid Chromatography (HPLC) and a phase change enthalpy value was characterized by Differential Scanning Colorimeter (DSC). A physical property of ternary nitrate salts in porous silica was characterized by Scanning Electron Microscope (SEM).

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ผศ.ดร. อภินันท์ นัมคณิสสรณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาโท ที่อบรมสั่งสอน วิชาความรู้พร้อมทั้งให้คำปรึกษาและคำแนะนำต่างๆ ในการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นระหว่างการศึกษา ทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ รศ.ดร. ประกอบ กิจไชยาอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผู้ให้คำปรึกษาและความช่วยเหลือในการดำเนินงานให้คำแนะนำตลอดงานวิจัยนี้สำเร็จ

ขอขอบคุณ อาจารย์ทุกท่านและเจ้าหน้าที่ทุกฝ่ายในภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สำหรับความรู้และคำแนะนำ การช่วยเหลือในการปฏิบัติงานตลอดการทำปริญญาโท

ขอบคุณ พี่และเพื่อนทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำแนะนำและกำลังใจในการดำเนินงาน

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้า ขอกราบขอขอบคุณ บิดา มารดา และครอบครัว ที่สนับสนุนและส่งเสริมจนสำเร็จการศึกษา อีกทั้งอบรมสั่งสอน ให้คำแนะนำและให้กำลังใจตลอดมา ประโยชน์อันใดที่เกิดจากปริญญาโทนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้แต่บิดา มารดาผู้เป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่สั่งสอน ถ่ายทอดวิชาความรู้และให้ประสบการณ์แก่ข้าพเจ้า หากมีข้อผิดพลาดประการใด ข้าพเจ้าขอน้อมรับและขออภัยมา ณ ที่นี้

จินต์จุฑา ขาวเชียร

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย .....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	II
กิตติกรรมประกาศ .....	III
สารบัญ .....	IV
สารบัญตาราง .....	VII
สารบัญรูป .....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	3
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ .....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	4
2.1 การจัดเก็บพลังงานความร้อน (Thermal energy storage; TES).....	4
2.1.1 การจัดเก็บพลังงานความร้อนสัมผัสในเกลือหลอมเหลวไนเตรท.....	4
2.1.2 การจัดเก็บพลังงานความร้อนแฝงในเกลือหลอมเหลวไนเตรท.....	5
2.2 วัสดุเปลี่ยนวิญภาค (Phase Change Material; PCM) .....	6
2.3 เกลือหลอมเหลว.....	7
2.3.1 เกลือหลอมเหลวไนเตรท .....	8
2.4 ระบบยูเทคติก (Eutectic system).....	9
2.4.1 ระบบยูเทคติกสององค์ประกอบ (Binary Eutectic System) .....	10
2.4.2 ระบบยูเทคติกสามองค์ประกอบ (Ternary Eutectic System) .....	10
2.5 น้ำตาลอินเวิร์ต (Inverted Sugar) .....	13
2.6 ซี้เก้้าเกลบ .....	14
2.6.1 ลักษณะของซี้เก้้าเกลบ .....	14
2.6.2 องค์ประกอบของซี้เก้้าเกลบ .....	14

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6.3 ประโยชน์ของซี้เถ้าเกลบ.....	14
2.7 ซิลิกอนไดออกไซด์.....	15
2.7.1 ลักษณะของซิลิกอนไดออกไซด์.....	15
2.7.2 คุณสมบัติทางเคมีของซิลิกอนไดออกไซด์.....	15
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	16
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน.....	18
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	18
3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	18
3.3 ขั้นตอนการทดลอง.....	18
3.3.1 ขั้นตอนการเตรียมสารละลายเกลือหลอมเหลวสามองค์ประกอบ.....	18
3.3.2 ขั้นตอนบรรจุเกลือหลอมเหลวในเตาหลงในรูปพูนซิลิกอนไดออกไซด์จากซี้เถ้าเกลบ.....	19
3.3.3 ขั้นตอนการสังเคราะห์น้ำตาลอินเวิร์ต.....	19
3.3.4 ขั้นตอนวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	19
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล.....	20
4.1 ปริมาณเกลือหลอมเหลวในเตาที่บรรจุในซิลิกาจากซี้เถ้าเกลบ.....	20
4.2 การวิเคราะห์ค่าพลังงานความร้อนของการเปลี่ยนวัฏภาคและอุณหภูมิหลอมเหลว ด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนิงแคลอริมิเตอร์ (DSC).....	20
4.3 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	23
4.4 การวิเคราะห์สัดส่วนของน้ำตาลอินเวิร์ตที่เกิดขึ้นด้วยเครื่องโครมาโทกราฟีเหลว สมรรถนะสูง (HPLC).....	23
4.5 การเปรียบเทียบค่าพลังงานที่ได้จากวัสดุเปลี่ยนวัฏภาค.....	24
4.5.1 การเปรียบเทียบค่าพลังงานที่ได้จากระบบเกลือหลอมเหลวในเตา.....	25
4.5.2 การเปรียบเทียบค่าพลังงานที่ได้จากระบบจากระบบน้ำตาล.....	25

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	26
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	26
5.1.1 ระบบจัดเก็บพลังงานความโดยใช้วัสดุเกลือไนเตรทหลอมเหลว.....	26
5.1.2 ระบบจัดเก็บพลังงานความโดยใช้วัสดุน้ำตาลอินเวิร์ต.....	26
5.1.3 เปรียบเทียบค่าพลังงานในการเปลี่ยนวัฏภาคระหว่างเกลือหลอมเหลวไนเตรทใน รูปอนุชิลิกาจากขี้เถ้าแกลบและน้ำตาลอินเวิร์ต.....	26
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	27
เอกสารอ้างอิง.....	28
ภาคผนวก.....	30
ภาคผนวก ก หลักการการทำงานของเครื่องมือวิเคราะห์.....	31
ภาคผนวก ข ข้อมูลและผลการทดลอง.....	35

## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 สัดส่วนองค์ประกอบของเกลือหลอมเหลวสามองค์ประกอบ .....	8
ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบที่เป็นธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน .....	14
ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบที่เป็นสารอนินทรีย์ที่พบในซีเมนต์ .....	14
ตารางที่ 4.1 ข้อมูลการบรรจุเกลือไนเตรทลงในรูปพูนซิลิกอนไดออกไซด์จากซีเมนต์ .....	20
ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบค่าพลังงานที่ได้จากวัสดุเปลี่ยนวัฏภาค .....	25
ตารางที่ ข.1 ข้อมูลการบรรจุเกลือไนเตรทลงในรูปพูนซิลิกอนไดออกไซด์จากซีเมนต์ .....	36
ตารางที่ ข.2 ผลข้อมูลจากการใช้เครื่องมือวิเคราะห์เครื่องดีพีเพอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์..	36
ตารางที่ ข.3 ผลข้อมูลจากการใช้เครื่องมือวิเคราะห์เครื่องโครมาโทกราฟีเหลวสมรรถนะสูง ของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสน้ำตาลทราย .....	37
ตารางที่ ข.4 ผลข้อมูลจากการใช้เครื่องมือวิเคราะห์เครื่องโครมาโทกราฟีเหลวสมรรถนะสูง ทำเป็น กราฟความเข้มข้นมาตรฐานของน้ำตาลทรายหรือซูโครส .....	37

# สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 ชนิดของพลังงานความร้อน .....	4
รูปที่ 2.2 แผนภาพวัฏภาคเกลือหลอมเหลวผสมของโพแทสเซียมไนเตรทและโซเดียมไนเตรท วัฏภาคขึ้นกับค่าเอนทัลปีระหว่างที่มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ที่สัดส่วนเกลือผสม สององค์ประกอบโพแทสเซียมไนเตรทร้อยละ 30 โดยมวลและโซเดียมไนเตรทร้อยละ 70 โดยมวล .....	5
รูปที่ 2.3 ชนิดของวัสดุที่เก็บความร้อน.....	6
รูปที่ 2.4 ความสามารถกักเก็บพลังงานความร้อนกับช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในการเปลี่ยนวัฏภาคของ ระบบจัดเก็บพลังงานความร้อน .....	6
รูปที่ 2.5 ความหนืดของสัดส่วนองค์ประกอบที่ 3 ประกอบด้วยแคลเซียมไนเตรท โซเดียมไนเตรท และโพแทสเซียมไนเตรทที่สัดส่วนร้อยละ 44, 12 และ 44 โดยมวลตามลำดับ สัดส่วนองค์ประกอบที่ 5 ประกอบด้วยแคลเซียมไนเตรท โซเดียมไนเตรทและ โพแทสเซียมไนเตรท ที่สัดส่วนร้อยละ 36, 16 และ 48 โดยมวลตามลำดับ และสัดส่วนองค์ประกอบที่ 6 ประกอบด้วยแคลเซียมไนเตรท โซเดียมไนเตรทและ โพแทสเซียมไนเตรทที่สัดส่วนร้อยละ 30, 24 และ 46 โดยมวลตามลำดับ .....	9
รูปที่ 2.6 จุดยูเทคติกในวัฏภาคไดอะแกรม.....	10
รูปที่ 2.7 สามมิติของระบบสามองค์ประกอบ .....	11
รูปที่ 2.8 สองมิติของระบบสามองค์ประกอบ .....	11
รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์อุณหภูมิของระบบสององค์ประกอบกับระบบสามองค์ประกอบ .....	12
รูปที่ 2.10 แผนภาพวัฏภาคของระบบที่มีสามองค์ประกอบ ได้แก่แคลเซียมไนเตรท โพแทสเซียม ไนเตรทและโซเดียมไนเตรท แสดงเส้นสภาวะของเหลวที่อุณหภูมิคงที่ แผนภาพวัฏภาค ของระบบที่มีองค์ประกอบ 2 ชนิด ด้านบนซ้ายคือของผสมของแคลเซียมไนเตรทและ โพแทสเซียมไนเตรท ด้านบนขวาคือของผสมของแคลเซียมไนเตรทและโซเดียมไนเตรท และด้านล่างคือของผสมของโพแทสเซียมไนเตรทและโซเดียมไนเตรท .....	13
รูปที่ 2.11 ปฏิกริยาไฮโดรไลซิสน้ำตาลทราย.....	13
รูปที่ 2.12 ลักษณะโครงสร้างของนาโนซิลิกอนไดออกไซด์ .....	15

## สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.1 ค่าพลังงานที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงวิภาคและอุณหภูมิในการหลอมเหลวของ เกลือไนเตรทสามองค์ประกอบ .....	20
รูปที่ 4.2 ค่าพลังงานที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงวิภาคและอุณหภูมิในการหลอมเหลวของตัวอย่าง ที่ 1 เกลือไนเตรทสามองค์ประกอบที่บรรจุลงในรูปพรุนของซิลิกาได้ร้อยละ 21.14 โดยมวล .....	21
รูปที่ 4.3 ค่าพลังงานที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงวิภาคและอุณหภูมิในการหลอมเหลวของตัวอย่าง ที่ 3 เกลือไนเตรทสามองค์ประกอบที่บรรจุลงในรูปพรุนของซิลิกาได้ร้อยละ 31.68 โดยมวล .....	21
รูปที่ 4.4 ค่าพลังงานที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงวิภาคและอุณหภูมิในการหลอมเหลวของ น้ำตาลทราย .....	22
รูปที่ 4.5 ค่าพลังงานที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงวิภาคและอุณหภูมิในการหลอมเหลวของ น้ำตาลอินเวิร์ต .....	22
รูปที่ 4.6 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงลักษณะโครงสร้างของ (ก) พื้นผิวของซี้ไถ้แกลบ (ข) ภาพตัดขวางของซี้ไถ้แกลบ (ค) พื้นผิวของซี้ไถ้แกลบ หลังบรรจุเกลือ (ง) ภาพตัดขวางของซี้ไถ้แกลบหลังบรรจุเกลือ .....	23
รูปที่ 4.7 ปริมาณซูโครสกับเวลาในการทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส .....	24
รูปที่ 4.8 ผลโครมาโทกราฟีเหลวสมรรถนะสูง (ก) ก่อนทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (ข) ปฏิกิริยา ไฮโดรไลซิส เมื่อผ่านไป 9 ชั่วโมง .....	24
รูปที่ ก.1 การทำงานเครื่องมือดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ .....	32
รูปที่ ก.2 การแยกสารของคอลัมน์ CARBOSEP Coregel-87C .....	33
รูปที่ ก.3 ส่วนประกอบและการทำงานของเครื่อง SEM .....	34
รูปที่ ข.1 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ขนาดกำลังขยาย 500 เท่า แสดงลักษณะโครงสร้างของ (ก) พื้นผิวของซี้ไถ้แกลบ (ข) ภาพตัดขวางของซี้ไถ้แกลบ (ค) พื้นผิวของซี้ไถ้แกลบหลังบรรจุเกลือ (ง) ภาพตัดขวางของซี้ไถ้แกลบหลังบรรจุเกลือ .....	37

## สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ ข.2 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ขนาดกำลังขยาย 1000 เท่า แสดงลักษณะโครงสร้างของ (ก) พื้นผิวของซีเถ้าเคลบ (ข) ภาพตัดขวางของซีเถ้าเคลบ (ค) พื้นผิวของซีเถ้าเคลบหลังบรรจุเกลือ (ง) ภาพตัดขวางของซีเถ้าเคลบหลังบรรจุเกลือ .....	37
รูปที่ ข.3 กราฟความเข้มข้นมาตรฐานของน้ำตาลทราย.....	39



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

เกลือหลอมเหลวยูเทคติกเป็นที่นิยมมากในการใช้เป็นของไหลถ่ายโอนความร้อนและเป็นวัสดุ กักเก็บพลังงานความร้อน งานทั่วไปที่ใช้เกลือหลอมเหลวยูเทคติกเพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงาน ของระบบ เช่น เทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าด้วยระบบรวมแสงอาทิตย์แบบรางพาราโบลา ระบบ พลังงานนิวเคลียร์ เป็นต้น การใช้เกลือหลอมเหลวเป็นระบบกักเก็บพลังงานความร้อนสำหรับเทคโนโลยี การผลิตไฟฟ้าด้วยระบบรวมแสงอาทิตย์แบบรางพาราโบลาเพื่อการดำเนินกระบวนการที่อุณหภูมิสูง กว่าที่ใช้น้ำมันไมเนอร์ล ดังนั้นการแปลงพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้าสามารถเพิ่มอย่างมี ประสิทธิภาพและมีนัยสำคัญ นอกจากนี้เกลือหลอมเหลวยูเทคติกมีความดันไอที่ต่ำกว่าน้ำมันไมเนอร์ล และช่วยลดความเครียดเชิงกลบนระบบโครงสร้างของกระบวนการการผลิตได้ เช่น ระบบท่อ ระบบ ถัง แล้วเกลือหลอมเหลวยังมีศักยภาพทางเศรษฐกิจสำหรับระบบกักเก็บพลังงานความร้อน เพราะ เกลือมีอยู่ทั่วไปในธรรมชาติจึงสามารถลดต้นทุนค่าวัสดุได้ แล้วความเป็นพิษของเกลือมีน้อย [1]

เกลือหลอมเหลวมีอุณหภูมิจุดหลอมเหลวสูง ดังนั้นจึงต้องเพิ่มองค์ประกอบของเกลือเพื่อช่วย ลดอุณหภูมิที่จุดหลอมเหลวลงได้ เพราะถ้าเกลือผสมที่มีจุดหลอมเหลวสูง จะส่งผลต่อกระบวนการ ทำงาน เนื่องจากระบบจำเป็นต้องการรักษารูปร่างของเกลือหลอมเหลวที่ใช้เป็นของไหลถ่ายโอน ความร้อนและระบบกักเก็บพลังงานความร้อน เพื่อให้เกลือหลอมเหลวคงสภาพเป็นของเหลวและ ป้องกันการตกผลึกของเกลือหลอมเหลว ดังนั้นการเพิ่มองค์ประกอบของเกลือจะช่วยลดจุด หลอมเหลวของเกลือหลอมเหลวยูเทคติกลงได้ เกลือหลอมเหลวไนเตรทสามองค์ประกอบจึงเป็นของ ไหลถ่ายโอนความร้อนและวัสดุกักเก็บความร้อนที่สำคัญของเทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าด้วยระบบรวม แสงอาทิตย์แบบรางพาราโบลา เนื่องจากสามารถช่วยลดค่าใช้จ่ายของการไฟฟ้า โดยจัดการ แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างของไหลถ่ายโอนความร้อนและวัสดุกักเก็บความร้อน สำหรับการเพิ่ม ประสิทธิภาพและลดภาระความร้อนเพื่อป้องกันการตกผลึกของเกลือหลอมเหลว แล้วการเพิ่มค่า ความจุความร้อนจำเพาะของวัสดุกักเก็บความร้อนโดยตรง สามารถลดการใช้จ่ายไฟฟ้าได้ ไม่เพียงแต่ สามารถลดต้นทุนวัตถุดิบ แต่ยังลดค่าบำรุงรักษาโครงสร้างของระบบท่อและถังได้

มีงานวิจัยศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพความร้อนจำเพาะ โดยการผสมซิลิกอนไดออกไซด์ อนุภาคระดับนาโนเมตรให้ไปกระจายตัวอยู่ในเกลือหลอมเหลวยูเทคติก ด้วยสัดส่วนร้อยละ 1 โดยมวลของเกลือหลอมเหลว สามารถเพิ่มความร้อนจำเพาะของเกลือหลอมเหลวยูเทคติกได้ แต่กลไกการเพิ่มความร้อนจำเพาะของเกลือหลอมเหลวก็ยังไม่ทราบเป็นที่ทราบแน่ชัด Shin et al. เสนอว่าการเพิ่มความร้อนจำเพาะโดยการผสมอนุภาคนาโนเมตร ส่วนใหญ่เป็นผลมาจาก โครงสร้างอนุภาคนาโนเมตร โดยการแยกส่วนประกอบของเกลือด้วยพื้นที่ผิวของอนุภาคนาโน เมตร [2]

ในงานวิจัยนี้ได้นำซิลิกอนไดออกไซด์จากขี้เถ้าแกลบมาใช้งานเนื่องจากว่า ประเทศไทยเป็น ผู้ผลิตข้าวเป็นอันดับต้นๆ ของโลก ในแต่ละปีมีปริมาณข้าวเปลือกที่ได้จากการเก็บเกี่ยวประมาณ 5.423 ล้านตัน (กรมวิชาการเกษตรข้อมูลพ.ศ.2544) เมื่อสีข้าวเปลือกแล้วจะได้ผลผลิตคือข้าวสาร

และกลบ โดยมีปริมาณกลบคิดเป็นร้อยละ 10 ของปริมาณข้าวเปลือกทั้งหมด แต่กลบเหล่านี้ไม่นำมาใช้ให้เป็นประโยชน์สูงสุด ซึ่งกลบถือว่าเป็นวัสดุเหลือทิ้งที่ได้จากกระบวนการสีข้าวเปลือกซึ่งทำให้เกิดเศษของเปลือกข้าวออกมา

ผลพลอยได้จากกระบวนการเผาไหม้กลบที่อุณหภูมิที่เหมาะสม จะเกิดเถ้าร้อยละ 13-30 เนื่องจากเถ้าเหล่านี้มีคุณภาพดี มีส่วนที่เป็นซิลิกอนไดออกไซด์สูง ประมาณร้อยละ 96.34 ส่วนอื่นประกอบด้วยแร่ธาตุต่างๆ ซึ่งเถ้ากลบมีขนาดอนุภาค รูพรุนขนาดเล็กและพื้นที่ผิวสูง สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมหลายประเภทเช่น อุตสาหกรรมผลิตเหล็ก ซีเมนต์ ไฟเบอร์ซีเมนต์ เป็นต้น เนื่องด้วยคุณสมบัติของซีเถ้ากลบที่มีรูพรุนและอนุภาคขนาดเล็กนั้น [15] จึงนำมาประยุกต์ใช้เป็นตัวกลางในการเก็บความร้อน (Heat transfer medium) สำหรับเกลือหลอมที่ทำหน้าที่เป็นตัวเก็บความร้อน (Thermal energy storage) หรือเรียกได้ว่าของไหลถ่ายเทความร้อน (Heat transfer fluid) โดยเกลือหลอมเหลวจะให้พลังงานโดยอาศัยหลักการวัสดุเปลี่ยนวิญภาค (Phase change materials) และได้ศึกษาระบบจัดเก็บความร้อนโดยใช้น้ำตาลอินเวิร์ตเป็นตัวกักเก็บความร้อน ซึ่งอาศัยหลักการเดียวกันคือน้ำตาลเวิร์ตถ่ายโอนพลังงานด้วยหลักการวัสดุเปลี่ยนวิญภาคเช่นเดียวกับเกลือหลอมเหลว เลือกศึกษาระบบจัดเก็บพลังงานความร้อนที่ใช้น้ำตาลอินเวิร์ตเป็นตัวถ่ายโอนความร้อนเนื่องจาก น้ำตาลอินเวิร์ตเป็นวัสดุเปลี่ยนวิญภาคที่มีค่าพลังงานในการเปลี่ยนวิญภาคสูงและเป็นพลังงานสะอาดไม่เกิดสารพิษ น้ำตาลอินเวิร์ตเกิดจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสน้ำตาลทรายด้วยกรดซัลฟิวริก ซึ่งองค์ประกอบของน้ำตาลอินเวิร์ตคือกลูโคสและฟรักโตสที่มีสัดส่วนโดยมวลเท่ากันนั้นคือ 1:1 โดยโมล [14]

งานวิจัยนี้ศึกษาพลังงานในการเปลี่ยนวิญภาคของน้ำตาลอินเวิร์ตและเกลือหลอมเหลวในเตาสามองค์ประกอบ ซึ่งประกอบด้วยแคลเซียมไนเตรท โซเดียมไนเตรทและโพแทสเซียมไนเตรท โดยการบรรจุเกลือหลอมเหลวในเตาเข้าไปในซิลิกอนไดออกไซด์จากซีเถ้ากลบ อาศัยคุณสมบัติความเป็นรูพรุนของซิลิกอนไดออกไซด์ คาดว่าเกลือหลอมเหลวที่บรรจุลงในรูพรุนของซิลิกอนไดออกไซด์จากซีเถ้ากลบจะสามารถเพิ่มค่าความจุความร้อนจำเพาะของเกลือหลอมเหลวสามองค์ประกอบได้ นอกจากนี้ยังสามารถช่วยลดการสึกกร่อนของโครงสร้างของระบบท่อและถังในกระบวนการ เนื่องจากกการกัดกร่อนของเกลือหลอมเหลว และการที่บรรจุลงในรูพรุนของซิลิกอนไดออกไซด์จากซีเถ้ากลบจะสามารถช่วยลดขนาดท่อในการขนส่งสารในการถ่ายโอนความร้อนและวัสดุที่กักเก็บความร้อนได้ เนื่องจากเกลือหลอมเหลวไม่ได้สัมผัสกับโครงสร้างของกระบวนการโดยตรง

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) ศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้คุณสมบัติความเป็นรูพรุนของซิลิกาในซีเถ้ากลบเพื่อการกักเก็บเกลือหลอมเหลวในเตา
- 2) ศึกษาความสามารถในการเก็บความร้อนและพลังงานในการเปลี่ยนวิญภาคของเกลือหลอมเหลวในเตาที่บรรจุในรูพรุนของซิลิกาจากซีเถ้ากลบและน้ำตาลอินเวิร์ต

## 1.3 ขอบเขตการวิจัย

- 1) การเตรียมเกลือผสมไนเตรทที่ประกอบด้วยแคลเซียมไนเตรท โซเดียมไนเตรทและโพแทสเซียมไนเตรทที่สัดส่วนร้อยละ 36, 16 และ 48 โดยมวลตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 2) ศึกษาการสังเคราะห์น้ำตาลอินเวิร์ต ด้วยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสน้ำตาลด้วยกรดซัลฟูริก
- 3) ศึกษาสภาวะในการบรรจุเกลือหลอมเหลวเข้าไปในรูพรุนของซิลิกาจากซีเถ้าแกลบเมื่อเกลือเป็นสารละลายอิ่มตัวที่อุณหภูมิห้อง
- 4) วิเคราะห์คุณสมบัติการเก็บความร้อนและพลังงานที่ใช้ในการเปลี่ยนวัฏภาคของเกลือหลอมเหลวในเตรทที่บรรจุในรูพรุนของซิลิกาจากซีเถ้าแกลบและน้ำตาลอินเวิร์ต

#### 1.4 ขั้นตอนดำเนินงาน

- 1) ศึกษาองค์ประกอบของซีเถ้าแกลบ
- 2) ศึกษาเกลือหลอมเหลวยูเทคติก
- 3) ศึกษาวิธีการสังเคราะห์น้ำตาลอินเวิร์ต
- 4) ศึกษาวิธีการบรรจุเกลือหลอมเหลวลงในรูพรุนของซิลิกาจากซีเถ้าแกลบ
- 5) วิเคราะห์ค่าความจุความร้อนพลังงานที่ใช้ในการเปลี่ยนวัฏภาคของอนุภาคของซิลิกาหลังบรรจุเกลือหลอมเหลวในเตรทสามองค์ประกอบและน้ำตาลอินเวิร์ตโดยใช้เครื่องมือดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Colorimeter; DSC)
- 6) วิเคราะห์องค์ประกอบสัดส่วนของน้ำตาลอินเวิร์ตที่เกิดขึ้นด้วยเครื่องโครมาโทกราฟีเหลวสมรรถนะสูง (High Performance Liquid Chromatography; HPLC)
- 7) เปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างของซิลิกอนไดออกไซด์จากซีเถ้าแกลบ ก่อนและหลังบรรจุเกลือหลอมเหลวในเตรท โดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM)

#### 1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

สามารถบรรจุเกลือหลอมเหลวในเตรทสามองค์ประกอบ ซึ่งประกอบด้วยแคลเซียมไนเตรท โซเดียมไนเตรทและโพแทสเซียมไนเตรท ลงในรูพรุนของซิลิกอนไดออกไซด์จากซีเถ้าแกลบได้ และทราบค่าพลังงานในการเปลี่ยนวัฏภาคการหลอมเหลวของเกลือหลอมเหลวในเตรทและน้ำตาลอินเวิร์ต

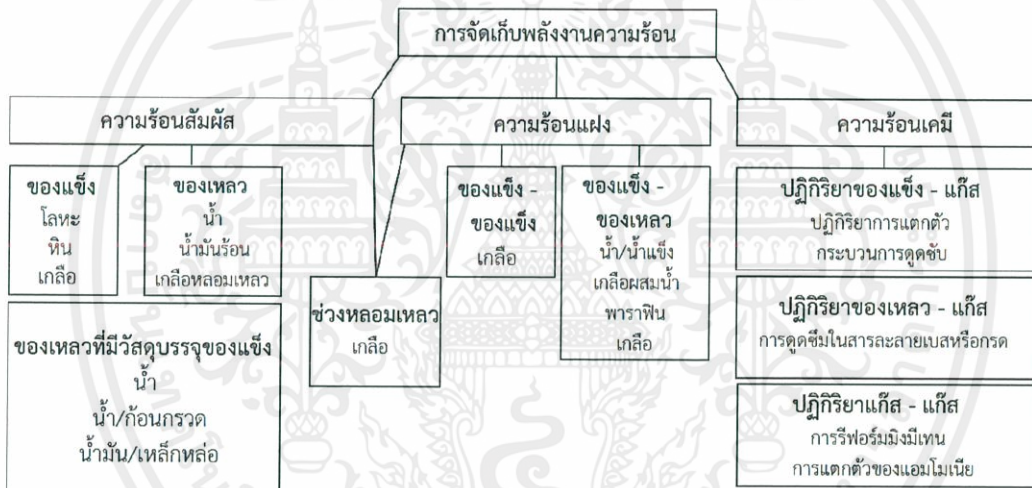
## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 การจัดเก็บพลังงานความร้อน (Thermal energy storage; TES) [3]

ระบบการจัดเก็บพลังงานความร้อน เป็นเทคนิคเลื่อนช่วงเวลาในการใช้พลังงาน โดยระบบจะกักเก็บความร้อนในวัสดุเปลี่ยนวิภาค ในช่วงเวลากลางวันหรือช่วงเวลาที่มิมีแสงแดด เพื่อนำไปใช้งานในเวลากลางคืนหรือช่วงเวลาที่มิมีแสงแดด จากพลังงานหมุนเวียนและใช้ประโยชน์จากความร้อนเหลือทิ้งในกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมโดยจัดเก็บพลังงานความร้อนที่ช่วยลดการใช้พลังงานขั้นสุดท้ายได้

การจัดเก็บพลังงานความร้อนได้ความร้อนมาจากหลากหลายรูปแบบทั้งความร้อนสัมผัส (Sensible heat) ความร้อนแฝงทำให้สารเปลี่ยนสถานะ (Latent heat) และความร้อนจากปฏิกิริยาเคมี (Chemical heat) แสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ชนิดของพลังงานความร้อน

#### 2.1.1 การจัดเก็บพลังงานความร้อนสัมผัสในเกลือหลอมเหลวในเตตรา

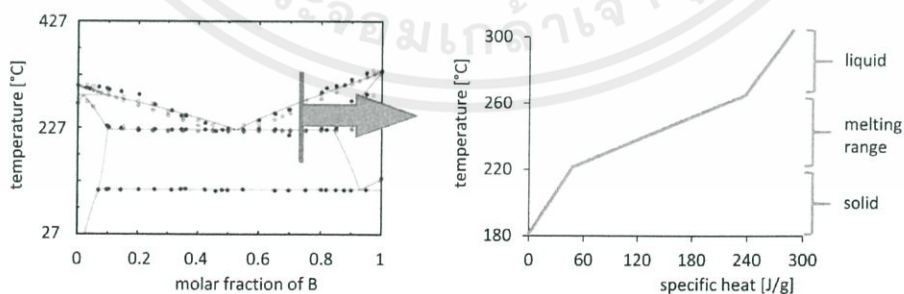
พลังงานความร้อนที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ความสามารถในการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแทนด้วยค่าความจุความร้อน (Heat capacity;  $C_p$ ) ข้อได้เปรียบของเกลือหลอมเหลวที่ใช้เป็นตัวจัดเก็บพลังงานความร้อนก็คือ จะมีความเสถียรทางความร้อนที่ดี และเป็นวัสดุที่ราคาไม่แพง มีค่าความจุความร้อนสูง ไม่เกิดการติดไฟและระเหยเป็นไอน้ำ แต่เมื่อเปรียบเทียบกับของไหลถ่ายโอนความร้อนชนิดอื่น เกลือหลอมเหลวจะมีจุดหลอมเหลวที่สูงกว่า เกลือหลอมเหลวต้องระมัดระวังในการใช้งานเพราะจะเป็นของแข็งที่อุณหภูมิห้อง ดังนั้นการพัฒนาให้เกลือหลอมเหลวมีจุดหลอมเหลวที่ต่ำจึงเป็นสิ่งสำคัญ แล้วข้อจำกัดของเกลือหลอมเหลวก็คือทำให้เกิดการกัดกร่อนทำให้ยากต่อการจัดการ

ความหนืดของเกลือหลอมเหลวก็เป็นสิ่งสำคัญที่มีผลต่อการเก็บพลังงานความร้อนสัมผัส เพราะเป็นสื่อในการถ่ายโอนพลังงานความร้อนในการเคลื่อนย้ายเกลือหลอมเหลว

### 2.1.2 การจัดเก็บพลังงานความร้อนแฝงในเกลือหลอมเหลวในเตา

เป็นพลังงานความร้อนที่ได้จากการเปลี่ยนวัฏภาค ความสามารถในการเปลี่ยนวัฏภาคแทนด้วยค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity;  $k$ ) ที่จุดเปลี่ยนวัฏภาคมีความสำคัญเนื่องจากค่าเหล่านี้สามารถตรวจสอบความจุปริมาตรได้ ที่จุดเปลี่ยนวัฏภาคจะเกิดขึ้นในช่วงของอุณหภูมิไม่เกิน 10 องศาเซลเซียส ส่งผลถึงการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปี จะเพิ่มขึ้นอย่างมาก เนื่องจากค่าเอนทัลปีขึ้นกับอุณหภูมิ ดังนั้นพลังงานที่เก็บไว้ในช่วงอุณหภูมิที่จำกัด 10 องศาเซลเซียส พลังงานจากวัสดุเปลี่ยนวัฏภาค (พลังงานความร้อนแฝง) จะให้พลังงานความร้อนมากกว่าเมื่อเทียบกับพลังงานความร้อนจากวัสดุที่เก็บพลังงานความร้อนสัมผัส

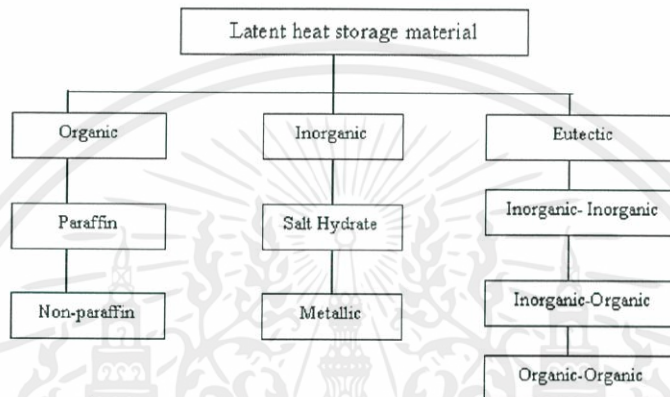
ระบบกักเก็บพลังงานส่วนใหญ่แล้วจะเก็บพลังงานในรูปแบบของพลังงานความร้อนสัมผัสหรือพลังงานความร้อนแฝง (พลังงานความร้อนในการเปลี่ยนวัฏภาค) แต่ในบางงานวิจัยได้ดำเนินการโดยนำทั้งสองรูปแบบการกักเก็บพลังงานมารวมกันเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพความจุความร้อน วัสดุที่เก็บพลังงานความร้อนสัมผัสแสดงคุณสมบัติด้วยความจุความร้อนจำเพาะ ปริมาณการกักเก็บความร้อนสัมผัสมีความสัมพันธ์กับช่วงอุณหภูมิที่ใช้และความจุความร้อนจำเพาะของวัสดุที่เก็บความร้อน การพัฒนาวัสดุที่เก็บความร้อนควรใช้ของค่าเอนทัลปีมาควบคู่ด้วย เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของความจุความร้อนจำเพาะ ข้อได้เปรียบของการใช้ค่าเอนทัลปีและความจุความร้อนจำเพาะควบคู่กันคือจะให้ความหนาแน่นของพลังงานความร้อนที่สูงขึ้น โดยใช้ช่วงอุณหภูมิหลอมละลายของเกลือผสมเป็นวัสดุที่เก็บพลังงานที่อุณหภูมิภายใต้ช่วงการเปลี่ยนวัฏภาคของของแข็งที่สมดุล ระหว่างช่วงการกักเก็บพลังงาน อัตราส่วนการหลอมเหลวต่อของแข็งจะเพิ่มขึ้น นั่นคือจะมีส่วนที่เริ่มกลายเป็นของเหลวมากขึ้น จึงเป็นการนำความร้อนสัมผัสและความร้อนแฝงมารวมกัน แสดงดังรูปที่ 2.2 เป็นแผนภาพวัฏภาคของเกลือหลอมเหลวผสมระหว่างโพแทสเซียมไนเตรทและโซเดียมไนเตรท คุณสมบัติของอุณหภูมิในกระบวนการกักเก็บพลังงานของเกลือหลอมเหลวที่สัดส่วนองค์ประกอบโพแทสเซียมไนเตรทร้อยละ 30 โดยมวลและโซเดียมไนเตรทร้อยละ 70 โดยมวล อุณหภูมิของวัสดุที่เก็บจะเพิ่มขึ้นระหว่างที่มีการกักเก็บความร้อนที่เพิ่มขึ้น ความร้อนที่กักเก็บใช้สำหรับการหลอมเหลวและให้ความร้อนกับเกลือ ดังนั้นอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นเปรียบเทียบกับระหว่างความร้อนแฝงกับความร้อนสัมผัส อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของช่วงความร้อนสัมผัสจะเพิ่มน้อยกว่าเมื่อเทียบกับช่วงของความร้อนสัมผัสที่มีความจุความร้อนจำเพาะเท่ากัน นั่นคือเหตุผลของประสิทธิภาพของความจุความร้อนจำเพาะของเกลือผสมในช่วงการหลอมเหลวที่สูงเมื่อเปรียบเทียบกับเกลือหลอมเหลว



รูปที่ 2.2 แผนภาพวัฏภาคเกลือหลอมเหลวผสมของโพแทสเซียมไนเตรทและโซเดียมไนเตรท วัฏภาคขึ้นกับค่าเอนทัลปีระหว่างที่มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ที่สัดส่วนเกลือผสมสององค์ประกอบ โพแทสเซียมไนเตรทร้อยละ 30 โดยมวลและโซเดียมไนเตรทร้อยละ 70 โดยมวล [3]

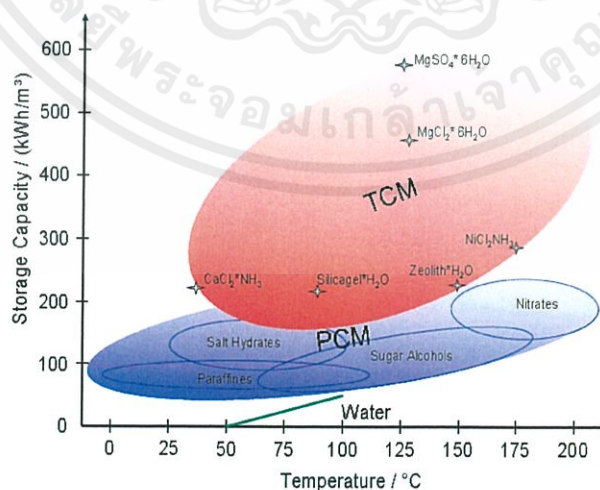
## 2.2 วัสดุเปลี่ยนวิญภาค (Phase Change Material; PCM) [4]

ทำหน้าที่กักเก็บความร้อนในเวลากลางวันและคายความร้อนออกมาใช้ในเวลากลางคืนหรือเมื่อไม่มีแสงแดด ปัจจุบันได้มีการศึกษาวิจัยเรื่องวัสดุกักเก็บความร้อนจำนวนมากเพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานในหลายๆ ด้าน แต่ปัจจัยศึกษาหลักคือ ชนิดของวัสดุกักเก็บความร้อนและช่วงอุณหภูมิของการหลอมเหลวของวัสดุกักเก็บความร้อน เพื่อจะได้นำมาใช้งานได้อย่างถูกต้องและเหมาะสมกับลักษณะงานที่ต้องการใช้วัสดุกักเก็บความร้อน สามารถจำแนกออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ สารอินทรีย์ (Organic) สารอนินทรีย์ (Inorganic) และสารยูเทคติก (Eutectic) หรือสารหลายองค์ประกอบชนิดอื่น ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ชนิดของวัสดุกักเก็บความร้อน

วัสดุกักเก็บความร้อน มีหลากหลายประเภท เช่น พาราฟิน นอนพาราฟินและสารยูเทคติก เป็นต้น ฉะนั้นการเลือกใช้วัสดุกักเก็บความร้อนจึงจำเป็นต้องมีคุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพที่เหมาะสมกับงานที่ใช้ เช่น คุณสมบัติในการกักเก็บปริมาณความร้อนที่เหมาะสม มีช่วงของการหลอมเหลวที่เหมาะสมกับงานที่จะนำไปใช้ ไม่เป็นพิษ ใช้งานง่ายในสภาพความดันบรรยากาศ มีความเสถียรและทนทานต่อการเสื่อมสภาพ ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมและระบบที่ใช้งานและสามารถเปลี่ยนสถานะได้โดยไม่ต้องมีการเสื่อมสภาพเมื่อมีการใช้งานเป็นเวลานาน เป็นต้น



รูปที่ 2.4 ความสามารถกักเก็บพลังงานความร้อนกับช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในการเปลี่ยนวิญภาคของระบบจัดเก็บพลังงานความร้อน [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.4 แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการจัดเก็บพลังงานความร้อนที่ได้จากวัสดุ ความร้อนทางเคมี สามารถบรรจุความร้อนได้มากกว่าวัสดุที่อาศัยความร้อนแฝง แต่เนื่องจากระบบที่ จัดเก็บความร้อนที่ใช้วัสดุความร้อนทางเคมี มีระบบที่ยุงยากและจัดการที่ยากกว่าระบบจัดเก็บ พลังงานความร้อนที่ใช้วัสดุเปลี่ยนวัฏภาค ซึ่งเป็นที่นิยมใช้ในปัจจุบันมากกว่าระบบที่จัดเก็บพลังงาน ความร้อนจากวัสดุเปลี่ยนวัฏภาคที่สามารถจัดเก็บพลังงานได้มากที่สุดอันดับ 1 คือ สารประกอบ ไนเตรทหรือเกลือไนเตรทที่ใช้ในระบบที่มีอุณหภูมิ 150-250 องศาเซลเซียส สามารถจัดเก็บพลังงาน ความร้อนได้ 150-250 kWh/m<sup>3</sup> อันดับ 2 คือสารละลายเกลือที่ใช้ในระบบที่มีอุณหภูมิ 30-120 องศาเซลเซียส สามารถจัดเก็บพลังงานความร้อนได้ 90-180 kWh/m<sup>3</sup> อันดับ 3 คือ น้ำตาลใช้ใน ระบบที่มีอุณหภูมิ 60-180 องศาเซลเซียส สามารถจัดเก็บพลังงานความร้อนได้ 70-180 kWh/m<sup>3</sup> และอันดับ 4 คือพาราฟินใช้ในระบบที่มีอุณหภูมิ 0-120 องศาเซลเซียส สามารถจัดเก็บพลังงานความ ร้อนได้ 80-100 kWh/m<sup>3</sup>

## 2.3 เกลือหลอมเหลว [6]

เป็นวัสดุที่เก็บความร้อนแบบสารยูเทคติก เกลือหลอมเหลวมีมากมายหลายชนิด มีทั้งที่เป็น องค์กรประกอบเดี่ยว สารผสมสององค์กรประกอบ สารผสมสามองค์กรประกอบหรือเป็นสารผสมมากกว่า สามองค์กรประกอบ โดยการเลือกใช้เกลือหลอมเหลวที่ดีควรเลือกเกลือหลอมเหลวผสมที่มีจุดหลอม ละลายต่ำและมีความเสถียรทางความร้อนที่ดี เนื่องจากเกลือเป็นสารที่มีจุดหลอมเหลวสูง เราจะใช้ เกลือผสมซึ่งจะทำให้จุดหลอมเหลวของเกลือลดลงได้ โดยใช้อุณหภูมิหลอมเหลวที่จุดยูเทคติก

มีงานวิจัยที่ได้สร้างแบบจำลองพฤติกรรมของเกลือหลอมเหลวผสมสองชนิดและสามชนิด ด้วยวิธีของงานวิจัยนั้น [7,8] ตัวอย่างเกลือหลอมเหลวผสมอย่างง่ายคือเกลือผสมโพแทสเซียมไนเตรท และโซเดียมไนเตรท โซเดียมไนเตรทมีจุดหลอมเหลว 307 องศาเซลเซียสและจุดหลอมเหลวของ โพแทสเซียมไนเตรทเท่ากับ 337 องศาเซลเซียส เมื่อนำมาผสมกันจะเกิดจุดยูเทคติกที่ส่วนผสม โซเดียมไนเตรทร้อยละ 46 โดยโมลและโพแทสเซียมไนเตรทร้อยละ 54 โดยโมล เมื่อเป็นเกลือผสมทำให้จุดหลอมเหลวของเกลือผสมจะลดลงเหลือเพียง 220 องศาเซลเซียสตัวอย่างเกลือผสมสามชนิดคือ ลิเทียมไนเตรท โพแทสเซียมไนเตรทและโซเดียมไนเตรท ลิเทียมไนเตรทมีจุดหลอมเหลว 253 องศาเซลเซียสเมื่อนำมาผสมกันจะเกิดจุดยูเทคติก ที่ส่วนผสมโซเดียมไนเตรทร้อยละ 18 โดยโมล โพแทสเซียมไนเตรทร้อยละ 44.5 โดยโมลและลิเทียมไนเตรทร้อยละ 37.5 โดยโมล มีจุด หลอมเหลวลดลงเหลือ 120 องศาเซลเซียส เมื่อเพิ่มลิเทียมไนเตรทจะสามารถลดจุดหลอมเหลว ได้จนมีอุณหภูมิ 102 องศาเซลเซียส เมื่อเทียบกับเกลือผสมโพแทสเซียมไนเตรทและโซเดียมไนเตรท

สมดุลสารทั้งระบบหนึ่งองค์กรประกอบ ระบบสององค์กรประกอบและระบบสามองค์กรประกอบ เมื่อผสมเกลือแล้วได้รับความร้อนและมีส่วนผสมที่เปลี่ยนแปลงไป ก็จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง ลักษณะทางกายภาพ คือทำให้วัฏภาคต่างๆเกิดการเปลี่ยนแปลง ส่งผลกระทบต่ออุณหภูมิยูเทคติก นั้นคือจะทำให้จุดหลอมเหลวของสารเปลี่ยนแปลงได้

ราคาของเกลือหลอมเหลวต่างๆ เป็นส่วนหนึ่งในการตัดสินใจการเลือกใช้เกลือผสมที่นำมาใช้ เป็นของไหลถ่ายโอนความร้อนได้กล่าวไว้ในงานวิจัยราคาของสารเรียงจากตามต่อไปนี้ แคลเซียม-ไนเตรท < โซเดียมไนเตรท < โซเดียม < โพแทสเซียมไนเตรท < ลิเทียมไนเตรท < ซีเซียมไนเตรท [9]

### 2.3.1 เกลือหลอมเหลวไนเตรท [10]

เกลือผสมไนเตรทสององค์ประกอบ จากที่กล่าวข้างต้นเกลือหลอมเหลวผสมระหว่างโพแทสเซียมไนเตรทและโซเดียมไนเตรท มีจุดหลอมเหลวที่สูงถึง 220 องศาเซลเซียส เนื่องจากที่อุณหภูมิจุดหลอมเหลวที่สูงนั้นจะส่งผลกระทบต่อระบบท่อและถังเก็บต่างๆ ในกระบวนการและนอกจากนี้ กระบวนการยังต้องรักษาอุณหภูมิให้จุดหลอมเหลวของสาร ถึง 220 องศาเซลเซียส ซึ่งถือว่าต้องใช้พลังงานในการให้ความร้อนมาก

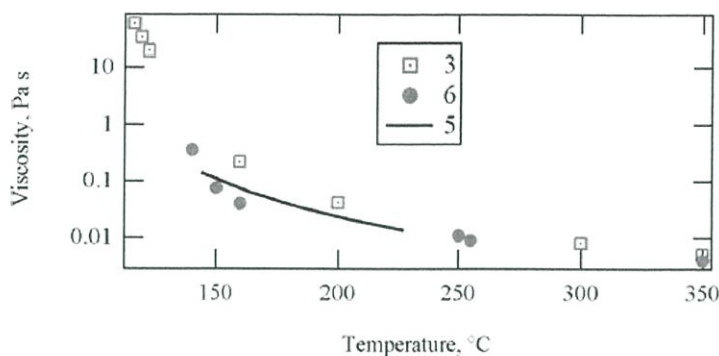
เมื่อเพิ่มแคลเซียมไนเตรท ผสมลงในเกลือผสมโพแทสเซียมไนเตรทและโซเดียมไนเตรทจะสามารถช่วยลดอุณหภูมิที่จุดหลอมเหลวลงได้ เกลือหลอมเหลวที่มีจุดหลอมเหลวยิ่งต่ำยิ่งดี เพราะสามารถหลีกเลี่ยงจุดตกผลึกของสารได้ง่าย และยังช่วยลดความยุ่งยากในกระบวนการทำงานได้อีก การใช้เกลือหลอมเหลวผสมสามชนิด เป็นของไหลถ่ายโอนความร้อนหรือที่เก็บความร้อน แทนเกลือหลอมเหลวผสมสองชนิดจะช่วยลดความเสี่ยงในเรื่องของการตกผลึกของของไหลถ่ายโอนความร้อน นั้นเป็นผลมาจากอุณหภูมิที่จุดหลอมเหลวลดลง ดังนั้นเกลือหลอมเหลวผสมสามองค์ประกอบ ซึ่งประกอบไปด้วยแคลเซียมไนเตรท โซเดียมไนเตรทและโพแทสเซียมไนเตรทจึงเป็นเกลือหลอมเหลวที่น่าสนใจ

จากงานวิจัยของ Judith C. Gomez และคณะ [11] ศึกษาสัดส่วนองค์ประกอบของเกลือหลอมเหลวสามองค์ประกอบซึ่งประกอบด้วยแคลเซียมไนเตรท โพแทสเซียมไนเตรทและโซเดียมไนเตรท ศึกษาทั้งหมด 6 สัดส่วนแสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สัดส่วนองค์ประกอบของเกลือหลอมเหลวสามองค์ประกอบ

สัดส่วน	ร้อยละโดยมวล (ร้อยละโดยโมล)		
	แคลเซียมไนเตรท	โซเดียมไนเตรท	โพแทสเซียมไนเตรท
1	48 (36)	7 (10)	45 (54)
2	45 (33)	11 (15)	44 (52)
3	44 (32)	12 (17)	44 (52)
4	42 (30)	15 (20)	43 (50)
5	36 (25)	16 (21)	48 (54)
6	30 (20)	24 (31)	46 (49)

จากทั้ง 6 สัดส่วนองค์ประกอบ มีอุณหภูมิที่จุดยูเทคติกอยู่ในช่วง 120-133 องศาเซลเซียส ความเสถียรของความร้อนจะลดลงเมื่อมีสัดส่วนของแคลเซียมไนเตรทเพิ่มขึ้น แต่จะทำให้จุดหลอมเหลวลดลง แต่ถ้าใส่สัดส่วนแคลเซียมไนเตรทมากเกินไป มากกว่าร้อยละ 42 โดยมวล ทำให้ความหนืดของสารเพิ่มมากขึ้น แสดงในรูปที่ 2.5 ส่งผลกระทบต่อ การสูบของไหลจะทำได้ยากขึ้นและมีค่าใช้จ่ายที่สูง ดังนั้นการหาสูตรสัดส่วนองค์ประกอบที่มีความหนืดต่ำสุดและเสถียรภาพทางความร้อนที่สูงที่สุดเป็นสิ่งสำคัญ



**รูปที่ 2.5** ความหนืดของสัดส่วนองค์ประกอบที่ 3 ประกอบด้วยแคลเซียมไนเตรท โซเดียมไนเตรท และโพแทสเซียมไนเตรทที่สัดส่วนร้อยละ 44, 12 และ 44 โดยมีมวลตามลำดับ สัดส่วนองค์ประกอบที่ 5 ประกอบด้วยแคลเซียมไนเตรท โซเดียมไนเตรทและโพแทสเซียมไนเตรทที่สัดส่วนร้อยละ 36, 16 และ 48 โดยมีมวลตามลำดับ และสัดส่วนองค์ประกอบที่ 6 ประกอบด้วยแคลเซียมไนเตรท โซเดียมไนเตรทและโพแทสเซียมไนเตรทที่สัดส่วนร้อยละ 30, 24 และ 46 โดยมีมวลตามลำดับ

สัดส่วนที่เหมาะสมที่สุดคือสัดส่วนที่ 5 ที่ประกอบด้วยแคลเซียมไนเตรท โซเดียมไนเตรทและโพแทสเซียมไนเตรทที่สัดส่วนร้อยละ 36, 16 และ 48 โดยมีมวลตามลำดับเพราะมีจุดตกผลึกของสารต่ำที่อุณหภูมิ 102 องศาเซลเซียส ระหว่างการให้ความร้อนจะมีอุณหภูมิการเปลี่ยนจากสถานะคล้ายแก้วที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส กับการคายความร้อนแล้วตกผลึกใหม่ที่อุณหภูมิ 76 องศาเซลเซียส (มีการปลดปล่อยพลังงาน 10 J/g) และจุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เมื่อต้องการหลอมเหลวสารอีกครั้งจะให้พลังงานที่น้อยลง พลังงานที่ใช้เฉลี่ยอยู่ที่ 24 J/g ข้อได้เปรียบของสัดส่วนที่ 5 นี้คือ มีความหนืดของสารต่ำ ค่าความเสถียรทางความร้อนสูง ความหนาแน่นและค่าการนำความร้อนดีกว่าสัดส่วนอื่นๆ

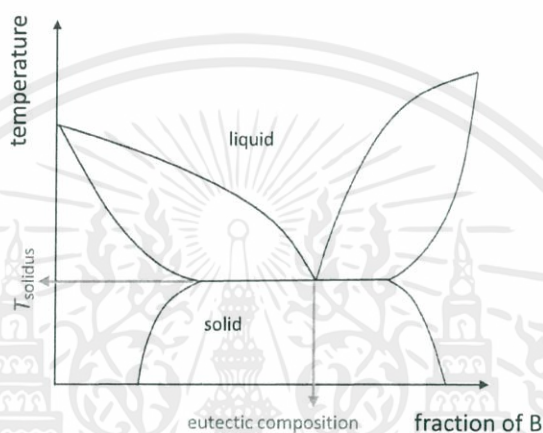
## 2.4 ระบบยูเทคติก (Eutectic system) [12,13]

เป็นระบบที่โลหะหรือธาตุทั้งสองต่างละลายกันได้สัดส่วนในสภาพของของเหลว แต่แยกกันอย่างเด็ดขาดในสภาพของแข็ง

หลักการของวิธีการลดอุณหภูมิสถานะที่เป็นของเหลวทำได้โดยการเพิ่มจำนวนไอออน หรือกล่าวได้ว่าเกลือหลอมเหลวที่มีหลายองค์ประกอบจะสามารถลดอุณหภูมิที่สถานะเป็นของเหลวลงได้เมื่อเปรียบเทียบกับเกลือหลอมเหลวหนึ่งองค์ประกอบ หรือเกลือหลอมเหลวสององค์ประกอบ การที่ของเหลวจะเปลี่ยนวิวัฒนาการเป็นของแข็ง เกลือหลอมเหลวหลายองค์ประกอบจะมีข้อได้เปรียบมากกว่า นั่นคือจะมีอุณหภูมิของเหลวที่ต่ำกว่า ดูได้จากวิวัฒนาการไดอะแกรมเนื่องจากเกลือหลอมเหลวที่มีหลายองค์ประกอบจะมีชนิดของไอออนที่ผสมกันมากกว่า ดังนั้นการเลือกส่วนผสมที่ทำให้จุดหลอมเหลวมีอุณหภูมิต่ำ สามารถดูได้จากวิวัฒนาการไดอะแกรมของสารผสม โดยดูจากจุดยูเทคติกเป็นวิธีการที่จะรวมพื้นผิวจากการก่อตัวอัลลอยด์ยูเทคติกที่เกิดขึ้นโดยความร้อนเหนืออุณหภูมิยูเทคติก ทำนองเดียวกับการเผาของเหลว (Liquid phase sintering) ถูกนำมาใช้ในด้านเซรามิกที่อุณหภูมิสูงและงานโลหะ

### 2.4.1 ระบบยูเทคติกสององค์ประกอบ (Binary Eutectic System)

เป็นระบบที่โลหะหรือธาตุทั้งสองต่างละลายกันได้ทุกสัดส่วนในสภาพของเหลว แต่จะแยกกันอย่างเด็ดขาดในสภาพของแข็ง สารผสมจะอยู่ในระบบยูเทคติก Cooling curve ของโลหะบริสุทธิ์และโลหะผสมที่มีโลหะบริสุทธิ์อีกชนิดหนึ่งเข้าไป ถ้ามีปริมาณ B เข้าไปผสมจะทำให้จุดแข็งตัวต่ำลงและจะต่ำลงเรื่อย ๆ เมื่อปริมาณ B เพิ่มมากขึ้น จนกระทั่งถึงจุด ๆ หนึ่งที่ต่ำที่สุดที่เรียกว่าจุดยูเทคติก เมื่อเพิ่ม B มากขึ้นค่าของจุดแข็งตัวจะสูงขึ้นไปอีก สารผสมที่จุดยูเทคติกนี้จะมีคุณสมบัติเหมือนธาตุหรือโลหะบริสุทธิ์ในด้านการแข็งตัวคือ แข็งตัวที่อุณหภูมิคงที่ โลหะทั้งสองชนิดจะเกิดโครงสร้างสลับกับของเนื้อโลหะระหว่าง A และ B เรียกว่าโครงสร้างยูเทคติก แสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 จุดยูเทคติกในวัฏภาคไดอะแกรม

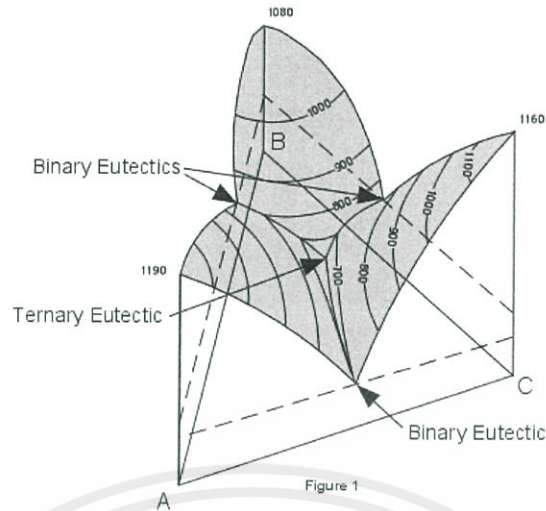
### แผนภาพภาคของระบบ 2 ธาตุ (Phase Diagram of Binary Systems)

ธาตุบริสุทธิ์คู่หนึ่งหรือสารประกอบอาจผสมเข้าด้วยกันได้ในจำนวนไม่มีที่สิ้นสุดของอัตราส่วนต่างๆ กัน สำหรับแต่ละส่วนผสมตลอดทั้งหมดในสภาวะสมดุลเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิและความดันซึ่งเป็นไปตามกฎของฮัม-รุธเตดิงนี้

- 1) ขนาดของอะตอมต้องแตกต่างกันไม่เกิน 15%
- 2) แต่ละอะตอมจะต้องไม่ทำปฏิกิริยากันเอง ซึ่งค่าของอิเล็กโตรเนกาติวิตี
- 3) แต่ละอะตอมไม่ควรมีวาเลนซ์อิเล็กตรอนเหมือนกัน
- 4) โครงสร้างผลึกในสารละลายของแข็งควรมีขนาดเท่ากัน

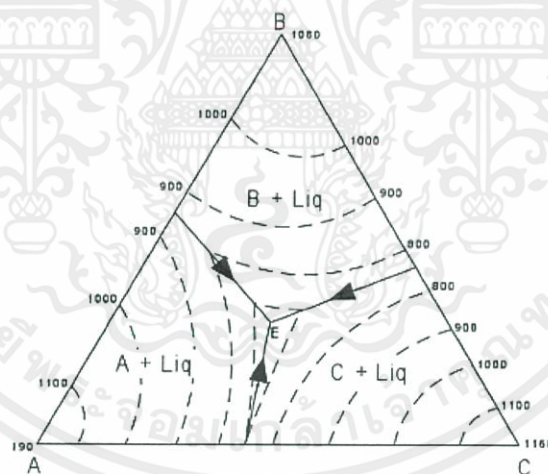
### 2.4.2 ระบบยูเทคติกสามองค์ประกอบ (Ternary Eutectic System)

สารผสมสามองค์ประกอบที่แตกต่างกันมักมีจุดหลอมเหลวและสร้างความสัมพันธ์ในระบบยูเทคติกสามองค์ประกอบ โดยระบบยูเทคติกสามองค์ประกอบจะแสดงด้วยแผนภาพสามเหลี่ยม



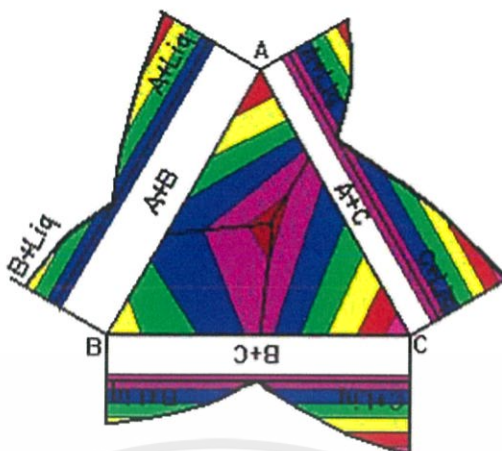
รูปที่ 2.7 สามมิติของระบบสามองค์ประกอบ

รูปที่ 2.7 แสดงการเป็นตัวแทนสามมิติของสามมิติของสามองค์ประกอบที่วัดตามด้านข้างของฐานสามเหลี่ยมและอุณหภูมิ (หรือความดัน) วัดในแนวตั้ง ด้านบนของรูปแสดงให้เห็นพื้นผิวที่มีความคิดเป็นเส้นชั้นความสูงของอุณหภูมิคงที่ รูปทรงเหล่านี้เรียกว่าเส้นไอโซเทอม โดยที่จุดยูเทคติกในแต่ละระบบของระบบสององค์ประกอบเข้าสู่ระบบที่เป็นระบบสามองค์ประกอบเป็นเส้นโค้ง เส้นโค้งเหล่านี้เรียกว่าเส้นโค้งขอบเขตและองค์ประกอบหนึ่งบนเส้นโค้งจะสามารถตกผลึกในทั้งสองวัฏภาคได้ที่ด้านใดด้านหนึ่งของเส้นโค้ง



รูปที่ 2.8 สองมิติของระบบสามองค์ประกอบ

รูปที่ 2.8 แสดงรูปเดียวกันในสองมิติ จากรูปที่ 2.7 เส้นโค้งขอบเขตและไอโซเทอมยังคงแสดงในรูปสามเหลี่ยม อุณหภูมิจะลดลงไปจนถึงจุดศูนย์กลางของรูป

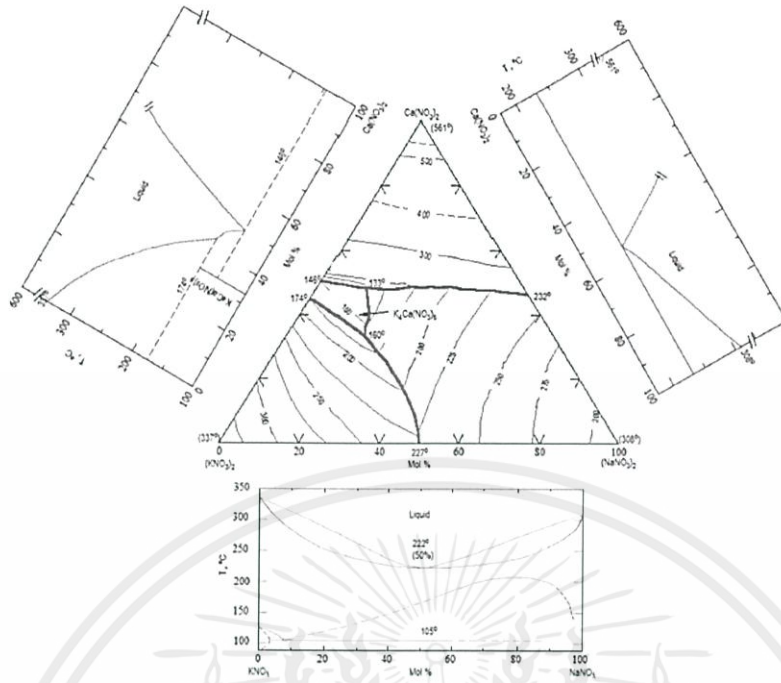


รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์อุณหภูมิของระบบสององค์ประกอบกับระบบสามองค์ประกอบ

รูปที่ 2.9 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในระบบสององค์ประกอบกับระบบสามองค์ประกอบ โดยส่วนมากจะมีเส้นไอโซเทอมของอุณหภูมิเสมอไม่สามารถตัดออกได้ แต่ถ้าเป็นระบบที่เป็นของเหลวทั้งหมดโดยไม่ต้องสนใจอุณหภูมิของของแข็งและของเหลว เส้นไอโซเทอมจะไม่มีนัยสำคัญ สามารถตัดออกได้

จุดที่เราคาดหวังให้ได้สัดส่วนองค์ประกอบของสามองค์ประกอบนี้ คือ จุดตรงกลางซึ่งเป็นจุดยูเทคติก จุดที่อุณหภูมิต่ำสุดที่สารสามองค์ประกอบจะรวมตัวกันแล้วกลายเป็นของเหลวทั้งหมดโดยต้องมีการปรับเปลี่ยนส่วนเพื่อให้เหมาะสมที่สุด

แผนภาพวิภูภาคของระบบที่มีสามองค์ประกอบ ได้แก่ แคลเซียมไนเตรท โพแทสเซียมไนเตรทและโซเดียมไนเตรท แสดงเส้นสภาวะของเหลวด้วยเส้นไอโซเทอม อุณหภูมิคงที่ แสดงในรูปที่ 2.10 โดยแผนภาพวิภูภาคของระบบสามองค์ประกอบจะประกอบไปด้วยระบบสององค์ประกอบ 3 ระบบย่อยได้แก่ระบบสององค์ประกอบของแคลเซียมไนเตรทกับโพแทสเซียมไนเตรท แคลเซียมไนเตรทกับโซเดียมไนเตรทและโพแทสเซียมไนเตรทกับโซเดียมไนเตรท ระบบสามองค์ประกอบนั้นจะมีจุดยูเทคติก 1 จุด และจุดเพอริเทคติก 1 จุด ที่จุดยูเทคติกจะมีอุณหภูมิต่ำสุดที่จะรวมกันเป็นของเหลวได้ ที่อุณหภูมิ 133 องศาเซลเซียสและจุดเพอริเทคติกเป็นจุดตัดที่สองใกล้กับอุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส

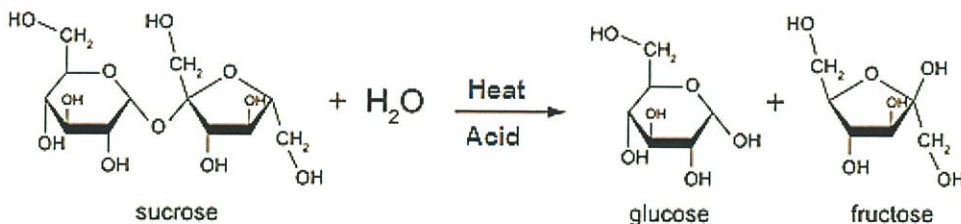


รูปที่ 2.10 แผนภาพวัฏภาคของระบบที่มีสามองค์ประกอบ ได้แก่แคลเซียมไนเตรท โพแทสเซียมไนเตรทและโซเดียมไนเตรท แสดงเส้นสภาวะของเหลวที่อุณหภูมิคงที่ แผนภาพวัฏภาคของระบบที่มีองค์ประกอบ 2 ชนิด ด้านบนซ้ายคือของผสมของแคลเซียมไนเตรทและโพแทสเซียมไนเตรท ด้านบนขวาคือของผสมของแคลเซียมไนเตรทและโซเดียมไนเตรท และด้านล่างคือของผสมของโพแทสเซียมไนเตรทและโซเดียมไนเตรท [11]

## 2.5 น้ำตาลอินเวิร์ต (Inverted Sugar) [14]

น้ำตาลอินเวิร์ตเป็นส่วนผสมของกลูโคสและฟรุกโตส ซึ่งได้จากการแยกสารซูโครสหรือน้ำตาลทรายออกเป็นสองส่วนประกอบนี้

ซูโครสเป็นน้ำตาลโมเลกุลคู่ ซึ่งเป็นโมเลกุลที่ประกอบด้วยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวสองชนิดคือ ฟรักโตสและกลูโคส การแยกซูโครสสามารถแยกได้ด้วยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสสามารถเกิดขึ้นได้ โดยการให้ความร้อนสารละลายของซูโครส แต่โดยทั่วไปจะมีตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นเพื่อเร่งการสลายพันธะไกลโคไซด์ (Glycosidic bond) ของซูโครสด้วยกรดหรือเอนไซม์ทำให้ได้น้ำตาลฟรักโตสและกลูโคสอย่างละเท่าๆกัน (1:1 โดยโมล) ในธรรมชาติพบน้ำตาลอินเวิร์ตในน้ำผึ้ง น้ำตาลอินเวิร์ตมีความหวานมากกว่าน้ำตาลทราย เพราะสมบัติเด่นของน้ำตาลฟรักโตส ซึ่งมีความหวานมากกว่าและตกผลึกได้ยากกว่า



รูปที่ 2.11 ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสน้ำตาลทราย

## 2.6 ขี้เถ้าแกลบ

### 2.6.1 ลักษณะของขี้เถ้าแกลบ [15,16]

ขี้เถ้าแกลบเป็นวัสดุที่มีน้ำหนักเบาและมีรูพรุนสูง ได้จากการเผาไหม้แกลบที่อุณหภูมิสูงประมาณ 700 องศาเซลเซียส ขี้เถ้าแกลบมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 150.47 ไมโครเมตร ขนาดอนุภาครูพรุนเฉลี่ยเท่ากับ 0.0042 ไมโครเมตร ปริมาตรจำเพาะของรูพรุน 0.35  $\text{cm}^3/\text{g}$  พื้นที่ผิวจำเพาะ 36.44  $\text{m}^2/\text{g}$  ซึ่งมีโครงสร้างเป็นแบบอสัณฐานและไม่มีรูปร่างแน่นอน

### 2.6.2 องค์ประกอบของขี้เถ้าแกลบ [17]

ขี้เถ้าแกลบมีองค์ประกอบ 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน แสดงดังตารางที่ 2.2 และสารอนินทรีย์ ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปสารประกอบออกไซด์ โดยมีซิลิกอนไดออกไซด์เป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งมีขนาดเล็กระดับนาโนเมตร แสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบที่เป็นธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน

ธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน	น้ำหนัก (wt%)
คาร์บอน ( $\text{CO}_2$ )	7.424
ไฮโดรเจน ( $\text{H}_2$ )	0.061
ไนโตรเจน ( $\text{N}_2$ )	0.846

ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบที่เป็นสารอนินทรีย์ที่พบในขี้เถ้าแกลบ

สารอนินทรีย์	ร้อยละโดยมวล
ซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ )	96.34
โปแตสเซียมออกไซด์ ( $\text{K}_2\text{O}$ )	2.31
แมกนีเซียมออกไซด์ ( $\text{MgO}$ )	0.45
อะลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )	0.41
แคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ )	0.41
ไอรอนออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )	0.2

### 2.6.3 ประโยชน์ของขี้เถ้าแกลบ

แกลบเป็นของเหลือทิ้งทางการเกษตร ที่ได้จากกระบวนการสีข้าว ในแต่ละปี มีปริมาณแกลบสูงถึงประมาณ 5,878.14 พันตัน จากการสำรวจ โดยสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ ในปี 2540 นั่นคือ ถ้ามีการสีข้าว 1 ตัน จะมีแกลบออกมาประมาณ 220 กิโลกรัม หรือคิดเป็นร้อยละ 22 สำหรับประเทศไทยมีการประเมินได้ว่าแต่ละปีจะมีแกลบประมาณ 4.4 ถึง 4.6 ล้านตัน (สมศักดิ์, 2545) ของเหลือทิ้งเหล่านี้บางส่วน ถูกนำไปใช้ประโยชน์เป็นปุ๋ย วัสดุปลูกรองนอน ในโรงเรือนเลี้ยงเป็ด เลี้ยงไก่ และในยุคที่ประเทศไทย มีความต้องการพลังงานสูง แกลบถูกนำมาเป็นเชื้อเพลิงทดแทนพลังงานจากน้ำมันดิบ จากสถิติการใช้พลังงานในประเทศไทย ในรายงานพลังงานของประเทศไทย ปี 2545 โดยกรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน พบว่าทดแทนพลังงานได้เทียบเท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำมันดิบ 0.89 ล้านตัน นอกจากนี้ซีอีเอ็ม ที่ได้จากการเผาไหม้ของแกลบ ยังสามารถส่งออกขายต่างประเทศได้อีกในราคา กิโลกรัมละ 3-4 บาท ซึ่งนับว่าเป็นผลพลอยได้ นอกเหนือจากการใช้เป็นแหล่งพลังงานทดแทนในขนาดอันใกล้ ด้วยเหตุผลด้านวิกฤตพลังงาน ด้านสิ่งแวดล้อม ด้านคุณภาพชีวิตชาวนาหรือด้านความสามารถ ในการแข่งขัน ตลอดจนการเกิดตลาดใหม่ที่มีผลตอบแทนคุ้มค่า อาจทำให้มีความต้องการแกลบสูงมาก โดยสรุปแล้วการใช้ประโยชน์จากแกลบ มีหลากหลายประการ ได้แก่ ใช้เป็นเชื้อเพลิงผลิตพลังงาน ใช้เป็นวัสดุการเกษตร ใช้สกัดสารซิลิกา ใช้เป็นวัสดุก่อสร้าง ใช้เป็นสารสำหรับใช้ในการกรองและอื่นๆ

## 2.7 ซิลิกอนไดออกไซด์ [18]

### 2.7.1 ลักษณะของซิลิกอนไดออกไซด์

ซิลิกอนไดออกไซด์ หรือที่รู้จักกันโดยทั่วไปว่า ซิลิกา สามารถเกิดขึ้นได้ตามธรรมชาติและการสังเคราะห์ขึ้น โดยมีลักษณะโครงสร้างเป็น  $O=Si=O$  ซิลิกาจะปรากฏอยู่ในสถานะรูปผลึกและมักอยู่ในรูปของควอตซ์ ทั้งนี้รูปร่างทางกายภาพของซิลิกาแบ่งได้เป็นสามแบบ คือ ผลึก (Crystalline) ออสัณฐาน (amorphous) และออสัณฐานสังเคราะห์ (Synthetic amorphous) วัสดุนาโนซิลิกา โดยทั่วไปแล้วมีรูปเป็นออสัณฐานสังเคราะห์ หรือที่เรียกว่า Synthetic amorphous silica หรือ SAS

ซิลิกาในรูปออสัณฐาน จะมีขนาดเล็กในช่วง 100-1000 นาโนเมตรและมีแนวโน้มที่จะรวมตัวกันเป็นกลุ่มจึงเป็นที่รู้จักในนามของ อนุภาคนาโนซิลิกา (Silica nanoparticles, SNPs) ในปัจจุบันได้มีการผลิตให้ SAS มีขนาดเล็กมากขึ้น โดยขนาดของอนุภาคนาโนซิลิกาในปัจจุบันมีขนาดเล็กถึง 10-25 นาโนเมตร การสังเคราะห์ด้วยการให้ความร้อนทำให้สามารถผลิตอนุภาคนาโนซิลิกาได้เล็กถึง 2 นาโนเมตร ขนาดของรูพรุนของนาโนซิลิกามักอยู่ในช่วง Mesopores ซึ่งมีขนาดประมาณ 2-50 นาโนเมตร หรืออาจอยู่ในรูปไม่มีรูพรุนได้

รูปที่ 2.12 ลักษณะโครงสร้างของนาโนซิลิกอนไดออกไซด์

### 2.7.2 คุณสมบัติทางเคมีของซิลิกอนไดออกไซด์

ซิลิกามีสมบัติทางเคมีที่ค่อนข้างเสถียรที่อุณหภูมิปกติ และไม่ทำปฏิกิริยาต่อสารเคมีหลายชนิด แต่สามารถเปลี่ยนรูปแบบได้ โดยซิลิกาชนิดออสัณฐานจะไวต่อปฏิกิริยามากกว่าซิลิกาชนิดผลึก เพราะซิลิกาออสัณฐานมีพื้นผิวมากกว่า

ส่วนสารละลายกรดจะไม่มีผลต่อซิลิกา ยกเว้นกรดไฮโดรฟลูออริก ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับซิลิกาจนได้  $H_2SiF_6$  ทั้งนี้ ซิลิกาในรูปแบบที่ต่างกันจะเกิดปฏิกิริยากับกรดไฮโดรฟลูออริกได้ต่างกัน

ขึ้นกับความหนาแน่นเป็นหลัก โดยซิลิกาที่มีความหนาแน่นสูงจะเกิดปฏิกิริยาได้น้อยกว่าซิลิกาที่มีความหนาแน่นต่ำ

อนุภาคนาโนซิลิกาไม่ละลายน้ำ เมื่อปรากฏในน้ำจะอยู่ในรูป  $\text{SiO}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$  โดยลักษณะพื้นผิวของซิลิกาจะเป็นลักษณะชอบน้ำ (Hydrophilicity) ซึ่งลักษณะสมบัตินี้จะเพิ่มขึ้นตามจำนวนของกลุ่มไฮดรอกซิลที่มีพันธะกับซิลิกอน หรือที่เรียกว่ากลุ่ม Silanols ในอนุภาคนาโนซิลิกา ซึ่งกลุ่มนี้จะทำให้เกิดการสร้างพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของน้ำ ซึ่งเป็นส่วนที่ทำให้อนุภาคนาโนซิลิกามีลักษณะสมบัติในการดูดซับน้ำได้ดีซึ่งลักษณะสมบัตินี้ได้ถูกนำมาใช้ในผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมต่างๆ

นอกจากนี้สารนาโนซิลิกานี้จัดได้ว่าเป็นสารเฉื่อย จึงมักนิยมนำมาใช้ในการผลิตอาหาร เช่น สารป้องกันการจับตัวเป็นก้อนของอาหาร สารลดฟองในเครื่องดื่ม เป็นต้น

## 2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Donghyun Shin [10] ศึกษาการแพร่กระจายลิกาไดออกไซด์ในเกลื่อหลอมเหลวสามองค์ประกอบ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของไหลถ่ายโอนความร้อนประยุกต์ใช้กับเทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าด้วยระบบรวมแสงอาทิตย์ โดยผสมซิลิกอนไดออกไซด์ 1เปอร์เซ็นต์มวล ของสารละลายทั้งหมด ด้วยวิธีการการแช่ซิลิกอนไดออกไซด์ในเกลื่อหลอมเหลวอุณหภูมิ 200-250 องศาเซลเซียส จากการทดลองพบว่าสามารถเพิ่มค่าความจุความร้อนจำเพาะได้ร้อยละ 19 เมื่อเปรียบเทียบกับเกลื่อหลอมเหลวที่ไม่ได้ผสมซิลิกอนไดออกไซด์ลงไป

Judith C. Gomez และคณะ [11] ศึกษาเกี่ยวกับสัดส่วนองค์ประกอบของเกลื่อหลอมเหลวไนเตรทสามองค์ประกอบ ซึ่งประกอบด้วยแคลเซียมไนเตรท โซเดียมไนเตรทและโพแทสเซียมไนเตรท ศึกษาทั้งหมด 6 สัดส่วนแล้วพบว่าสัดส่วนที่ดีที่สุดคือสัดส่วนที่ประกอบด้วยแคลเซียมไนเตรทร้อยละร้อยละ 36 โดยมีมวล โซเดียมไนเตรทร้อยละ 16 โดยมีมวลและโพแทสเซียมไนเตรทร้อยละ 48 โดยมีมวล เพราะมีจุดตกผลึกของสารที่ต่ำ 102 องศาเซลเซียส และจุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เมื่อต้องการหลอมเหลวสารอีกครั้งจะให้พลังงานที่น้อยลง แล้วสัดส่วนนี้มีความหนืดของสารต่ำ ค่าความเสถียรทางความร้อนสูง ความหนาแน่นและค่าการนำความร้อนดีกว่าสัดส่วนอื่นๆ

Vimal Chandra Srivastava และ Indra Deo Mall [15] ศึกษาเกี่ยวกับลักษณะและองค์ประกอบของซีเมนต์แก้ว ซึ่งองค์ประกอบของซีเมนต์แก้วประกอบด้วยซิลิกอนไดออกไซด์เป็นองค์ประกอบหลัก มีถึงร้อยละ 96.34 ของน้ำหนักรวม แล้วซีเมนต์แก้วเป็นวัสดุที่มีราคาถูกและมีความหลากหลายทางด้านสมบัติเชิงเคมีและฟิสิกส์ ซึ่งสามารถใช้แทนซิลิกอนไดออกไซด์สังเคราะห์ได้

Lu-di Zhang และคณะ [19] ศึกษาเกี่ยวกับการแพร่กระจายซิลิกอนไดออกไซด์ในเกลื่อหลอมเหลวสี่องค์ประกอบ เพื่อเพิ่มค่าความจุความร้อนจำเพาะของเกลื่อหลอมเหลว แล้วการที่ใช้เกลื่อหลอมเหลวสี่องค์ประกอบเพื่อลดจุดหลอมเหลวของเกลื่อ เพื่อประยุกต์ใช้กับเทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าด้วยระบบรวมแสงอาทิตย์ ทำการทดลองโดยใช้ซิลิกอนไดออกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์ในเปอร์เซ็นต์มวลของสารละลายทั้งหมด การผสมซิลิกอนไดออกไซด์กับเกลื่อหลอมเหลวใช้วิธีอัลตราโซนิก ที่ความถี่ 45 kHz ค่าความจุความร้อนจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นเมื่อซิลิกาไดออกไซด์เริ่มแพร่กระจายในเกลื่อหลอมเหลว พบว่าการแพร่กระจายของซิลิกอนไดออกไซด์สามารถเพิ่มค่าความจุความร้อนจำเพาะได้ถึงร้อยละ 16.9-21.2 เมื่อเปรียบเทียบกับเกลื่อหลอมเหลวที่ไม่ได้ผสมซิลิกอนไดออกไซด์ลงไป

Joo Hyun Seo and Dong Hyun Shin [20] ศึกษาอิทธิพลขนาดอนุภาคซิลิกอนไดออกไซด์ที่กระจายตัวในเกลือหลอมเหลวสามองค์ประกอบมีผลต่อค่าความจุความร้อนจำเพาะ โดยศึกษาขนาดอนุภาคซิลิกาขนาด 5 นาโนเมตร 10 นาโนเมตร 30 นาโนเมตร และ 60 นาโนเมตร โดยผสมซิลิกอนไดออกไซด์ร้อยละ 1 โดยมวลของสารละลายทั้งหมด การที่ใช้เกลือหลอมเหลวสามองค์ประกอบเพื่อลดจุดหลอมเหลวของเกลือหลอมเหลวและความเสถียรความร้อนสูง การเพิ่มค่าความจุความร้อนของเกลือหลอมเหลวจะช่วยลดค่าต้นทุนของวัสดุและขนาดของระบบท่อและถังได้ จากการทดลองพบว่าสามารถเพิ่มค่าความจุความร้อนจำเพาะได้ร้อยละ 13-16 เมื่อเปรียบเทียบกับเกลือหลอมเหลวที่ไม่ได้ผสมซิลิกอนไดออกไซด์ลงไป

Minna Hurtt และคณะ [21] ศึกษาพฤติกรรมพลังงานที่ใช้ในการเปลี่ยนวิภาคและช่วงการหลอมเหลวของซูโครส กลูโคส และฟรักโทส โดยศึกษาอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ พบว่าเมื่ออัตราการของอุณหภูมิแตกต่างกันจะทำให้คุณสมบัติที่ได้ของน้ำตาลที่ต่างกันด้วย เช่น  $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$  rate ได้อุณหภูมิหลอมเหลวและพลังงานในการเปลี่ยนวิภาคของซูโครสดังนี้  $184.5^{\circ}\text{C}$  และ  $126.6 \text{ J/g}$  ของ กลูโคสคือ  $146.5^{\circ}\text{C}$  และ  $185.4 \text{ J/g}$  และของฟรักโทส  $112.7^{\circ}\text{C}$  และ  $154.1 \text{ J/g}$  และที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ  $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$  การเปลี่ยนวิภาคของซูโครสดังนี้  $188.9^{\circ}\text{C}$  และ  $134.4 \text{ J/g}$  ของ กลูโคสคือ  $155.2^{\circ}\text{C}$  และ  $194.3 \text{ J/g}$  และของฟรักโทส  $125.7^{\circ}\text{C}$  และ  $176.7 \text{ J/g}$



## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงาน

#### 3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- 1) เตาอบและเตาอบสูญญากาศ
- 2) เครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง
- 3) กระจกตาชกรอง
- 4) กรวยบุชเนอร์
- 5) เครื่องสูบล้างสูญญากาศ
- 6) ขวดกรองสาร ขนาด 250 มิลลิลิตร
- 7) บีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร
- 8) ขวดกั้นกลมสามคอ ขนาด 250 มิลลิลิตร
- 9) กรวยหยดสาร
- 10) เครื่องกวนสารให้ความร้อน
- 11) แท่งแก้วคนสาร
- 12) ตู้อุดควัน
- 13) เทอร์โมมิเตอร์
- 14) เครื่องกลั่นระเหยสารแบบหมุน
- 15) เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ (Jacketed flask)
- 16) Magnetic stirrer

#### 3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- 1) แคลเซียมไฮดรอกไซด์
- 2) โซเดียมไฮดรอกไซด์
- 3) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์
- 4) กรดไนตริก 69%
- 5) ซึ้แก้วกลบ
- 6) น้ำกลั่น
- 7) น้ำตาลทราย
- 8) กรดซัลฟิวริก 98%

#### 3.3 ขั้นตอนการทดลอง

##### 3.3.1 ขั้นตอนการเตรียมสารละลายเกลือหลอมเหลวสามองค์ประกอบ

- 1) เตรียมแคลเซียมไฮดรอกไซด์ 16.26 กรัม โซเดียมไฮดรอกไซด์ 7.53 กรัม โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 26.64 กรัม และกรดไนตริก 100 กรัม แล้วนำมาผสมรวมกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) นำสารผสมมาให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เพื่อเป็นการไล่กรดไนตริกที่เหลืออยู่ออกไปให้หมด

3) เติมน้ำกลั่น 45 กรัม เพื่อให้ได้สารละลายอิมัลชันเกลือหลอมเหลวไนเตรท ประกอบด้วยแคลเซียมไนเตรท โซเดียมไนเตรทและโพแทสเซียมไนเตรทที่สัดส่วนร้อยละ 36, 16 และ 48 โดยมวล ตามลำดับที่อุณหภูมิห้อง

### 3.3.2 ขั้นตอนการบรรจุเกลือหลอมเหลวไนเตรทลงในรูพรุนซิลิกอนไดออกไซด์จากซีเถ้าแอลบ

1) นำซีเถ้าแอลบ 1 กรัม บรรจุลงขวดก้นกลม แล้วลดความดันให้เป็นสุญญากาศเป็นเวลา 10 นาที

2) บรรจุสารละลายเกลือหลอมเหลวไนเตรทอิมัลชันลงในกรวยหยดสาร

3) เมื่อถึงความดันขวดก้นกลมเป็นสุญญากาศครบ 10 นาทีแล้วจากนั้นค่อยๆ หยดสารละลายเกลือหลอมเหลวไนเตรทอิมัลชันที่บรรจุอยู่ในกรวยหยดสารลงในขวดก้นกลมที่บรรจุซีเถ้าแอลบ หยดจนสารละลายเกลือท่วมซีเถ้าแอลบ

4) นำซีเถ้าแอลบที่บรรจุสารละลายอิมัลชันเกลือหลอมเหลวไนเตรท มากรองแยกซีเถ้าแอลบที่บรรจุเกลือ กับสารละลายเกลือที่เหลือออกจากกัน กรองโดยใช้การกรองแบบสุญญากาศ

5) ใช้น้ำร้อนเทล้างปริมาณเล็กน้อย บนซีเถ้าแอลบเพื่อล้างเกลือไนเตรทที่ติดอยู่รอบๆ ซีเถ้าแอลบออก

6) นำซีเถ้าแอลบที่กรองแล้ว เข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง เพื่อระเหยน้ำออกให้หมด

### 3.3.3 ขั้นตอนการสังเคราะห์น้ำตาลอินเวิร์ต

1) ชั่งน้ำตาลทราย 300 กรัม ผสมกับน้ำกลั่น 200 กรัม เพื่อให้ได้สารละลายน้ำตาลอิมัลชันร้อยละ 60 โดยมวล บรรจุลงในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ

2) จากนั้นวางเครื่องปฏิกรณ์แบบกะบนเครื่องกวนสารให้ความร้อน แล้วปฏิบัติที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส โดยใส่กรดซัลฟิวริกร้อยละ 0.1 โดยมวล เพื่อเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 9 ชั่วโมง

3) นำสารละลายที่ได้เข้าเครื่องกลั่นระเหยสารแบบหมุน เพื่อระเหยน้ำที่มีอยู่ออก

### 3.3.4 ขั้นตอนวิเคราะห์ผลการทดลอง

1) วิเคราะห์ค่าความจุความร้อนพลังงานที่ใช้ในการเปลี่ยนวัฏภาคของอนุภาคของซิลิกาหลังบรรจุเกลือหลอมเหลวไนเตรทสามองค์ประกอบและและน้ำตาลอินเวิร์ตโดยใช้เครื่องมือดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Colorimeter; DSC)

2) วิเคราะห์องค์ประกอบสัดส่วนของน้ำตาลอินเวิร์ตที่เกิดขึ้นด้วยเครื่องโครมาโทกราฟีเหลวสมรรถนะสูง (High Performance Liquid Chromatography; HPLC)

3) คุณลักษณะโครงสร้างของซิลิกอนไดออกไซด์จากซีเถ้าแอลบ เปรียบเทียบก่อนและหลังบรรจุเกลือหลอมเหลวไนเตรท โดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM)

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

#### 4.1 ปริมาณเกลือหลอมเหลวไนเตรทที่บรรจุในซิลิกาจากซีเถ้าแกลบ

เมื่อทำการบรรจุเกลือหลอมเหลวไนเตรทสามองค์ประกอบ อยู่ในรูปสารละลายอิมัตว ที่อุณหภูมิห้อง ขนาดของซีเถ้าแกลบ 250-450 ไมโครเมตร ปริมาตรรูพรุนของโครงสร้างซิลิกาจาก ซีเถ้าแกลบมีขนาด  $0.35 \text{ cm}^3/\text{g}$  และโครงสร้างจากซิลิกาเป็นแบบอสัณฐาน

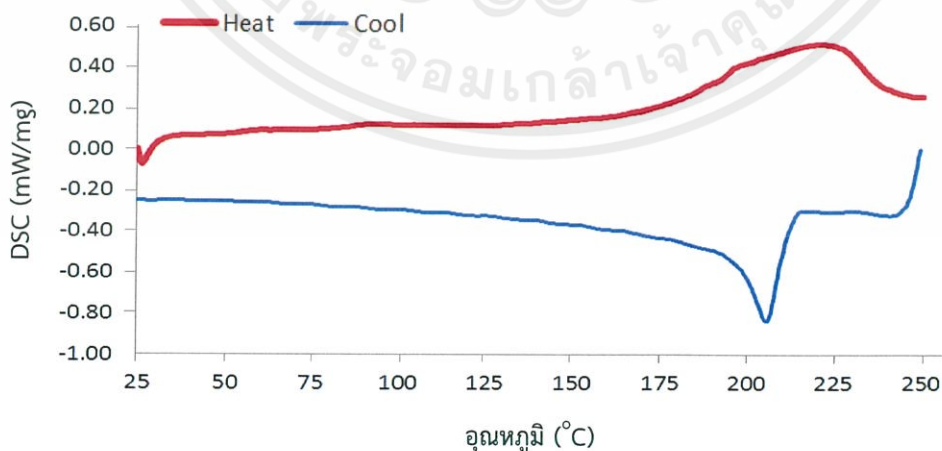
ตารางที่ 4.1 ข้อมูลการบรรจุเกลือไนเตรทลงในรูพรุนซิลิกอนไดออกไซด์จากซีเถ้าแกลบ

รายการ	การทดลองที่ 1	การทดลองที่ 2
เกลือที่บรรจุได้ ร้อยละโดยมวล	21.14	31.69
เกลือที่บรรจุได้ ร้อยละโดยปริมาตร	36.87	63.82

จากการทดลองพบว่า ค่าเฉลี่ยจากที่ทำการทดลองทั้งหมดที่สามารถบรรจุเกลือหลอมเหลว ไนเตรทสามองค์ประกอบลงในรูพรุนของซิลิกอนไดออกไซด์จากซีเถ้าแกลบได้คือร้อยละ 30 โดยมวลหรือร้อยละ 58.95 โดยปริมาตร

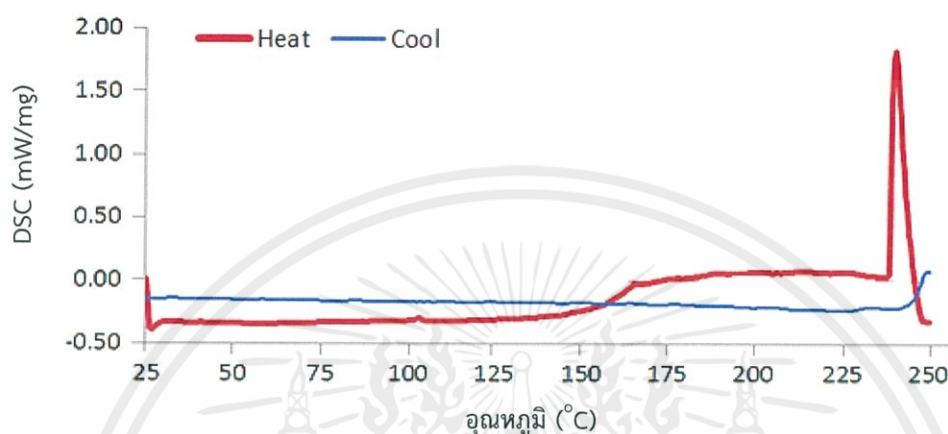
#### 4.2 การวิเคราะห์ค่าพลังงานความร้อนของการเปลี่ยนวัฏภาคและอุณหภูมิหลอมเหลว ด้วยเครื่องดีพีเพอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์

เมื่อนำเกลือผสมไนเตรทที่ประกอบด้วยแคลเซียมไนเตรท โซเดียมไนเตรทและโพแทสเซียม ไนเตรทที่สัดส่วนร้อยละ 36, 16 และ 48 โดยมวลตามลำดับ ไปวิเคราะห์ค่าการเปลี่ยนแปลงพลังงาน และอุณหภูมิหลอมเหลวด้วยเครื่องมือดีพีเพอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ พบว่ามีค่าพลังงานในการเปลี่ยนวัฏภาค  $75.86 \text{ J/g}$  และช่วงอุณหภูมิการหลอมเหลว 150-240 องศาเซลเซียส แสดงได้ดัง รูปที่ 4.1



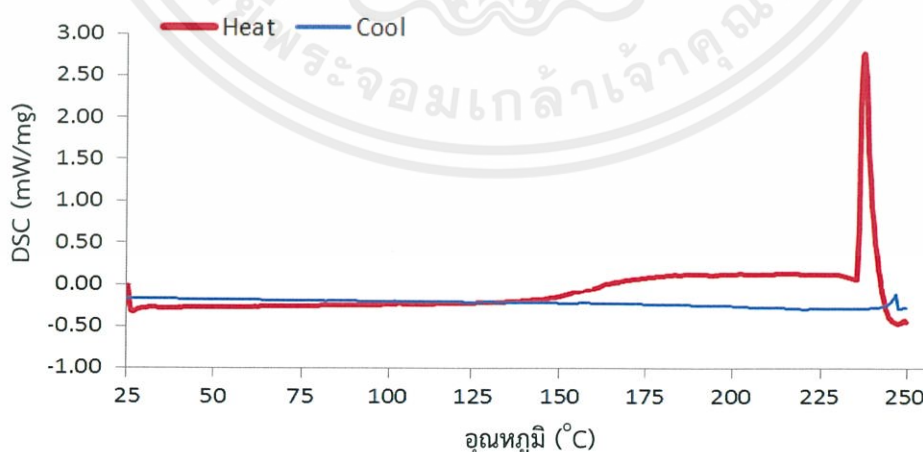
รูปที่ 4.1 ค่าพลังงานที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงวัฏภาคและอุณหภูมิในการหลอมเหลวของเกลือไนเตรท สามองค์ประกอบ

เมื่อนำเกลือผสมไนเตรทที่ประกอบด้วยแคลเซียมไนเตรท โซเดียมไนเตรทและโพแทสเซียมไนเตรทที่สัดส่วนร้อยละ 36, 16 และ 48 โดยมวลตามลำดับ บรรจุลงในรูปพูนของซิลิกาจากซีเถ้า แกลบ ตัวอย่างที่บรรจุเกลือผสมไนเตรทได้ร้อยละ 21.14 โดยมวล ไปวิเคราะห์ค่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานและอุณหภูมิหลอมเหลวด้วยเครื่องมือดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ พบว่ามีค่าพลังงานในการเปลี่ยนวัฏภาค 38.91 J/g และช่วงอุณหภูมิการหลอมเหลว 235-240 องศาเซลเซียส แสดงได้ดังรูปที่ 4.2



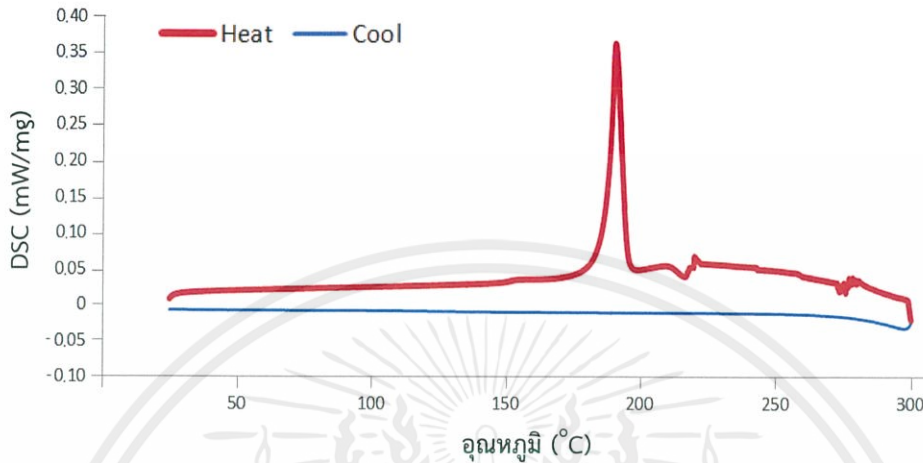
รูปที่ 4.2 ค่าพลังงานที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงวัฏภาคและอุณหภูมิในการหลอมเหลวของตัวอย่างที่ 1 เกลือไนเตรทสามองค์ประกอบที่บรรจุลงในรูปพูนของซิลิกาได้ร้อยละ 21.14 โดยมวล

เมื่อนำเกลือผสมไนเตรทที่ประกอบด้วยแคลเซียมไนเตรท โซเดียมไนเตรทและโพแทสเซียมไนเตรทที่สัดส่วนร้อยละ 36, 16 และ 48 โดยมวลตามลำดับ บรรจุลงในรูปพูนของซิลิกาจากซีเถ้า แกลบ ตัวอย่างที่บรรจุเกลือผสมไนเตรทได้ร้อยละ 31.69 โดยมวล ไปวิเคราะห์ค่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานและอุณหภูมิหลอมเหลวด้วยเครื่องมือดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ พบว่ามีค่าพลังงานในการเปลี่ยนวัฏภาค 50.27 J/g และช่วงอุณหภูมิการหลอมเหลว 235-245 องศาเซลเซียส แสดงได้ดังรูปที่ 4.3



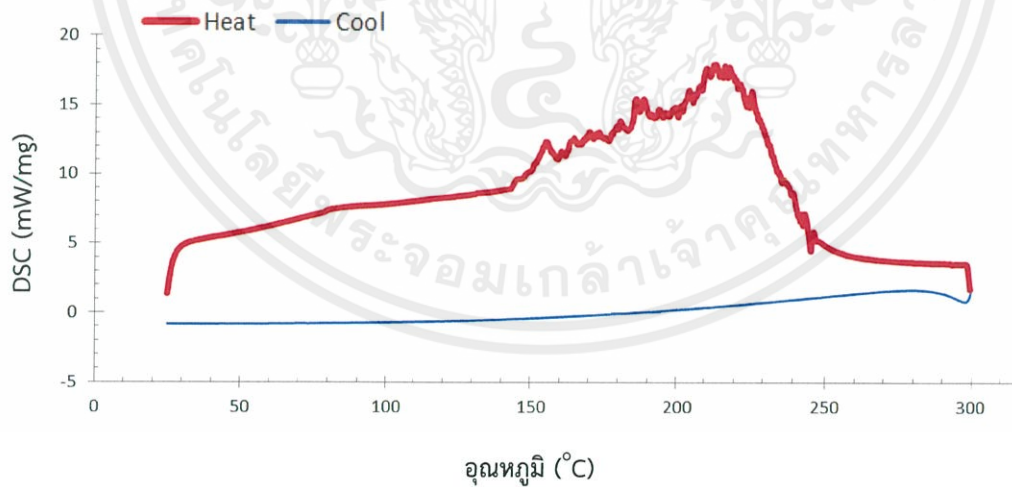
รูปที่ 4.3 ค่าพลังงานที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงวัฏภาคและอุณหภูมิในการหลอมเหลวของตัวอย่างที่ 2 เกลือไนเตรทสามองค์ประกอบที่บรรจุลงในรูปพูนของซิลิกาได้ร้อยละ 31.69 โดยมวล

เมื่อนำน้ำตาลทรายซึ่งเป็นส่วนประกอบของซูโครสไปวิเคราะห์ค่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานและอุณหภูมิหลอมเหลวด้วยเครื่องมือดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ พบว่ามีค่าพลังงานในการเปลี่ยนวิภาค 113.39 J/g และช่วงอุณหภูมิการหลอมเหลว 187-195 องศาเซลเซียส แสดงได้ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ค่าพลังงานที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงวิภาคและอุณหภูมิในการหลอมเหลวของน้ำตาลทราย

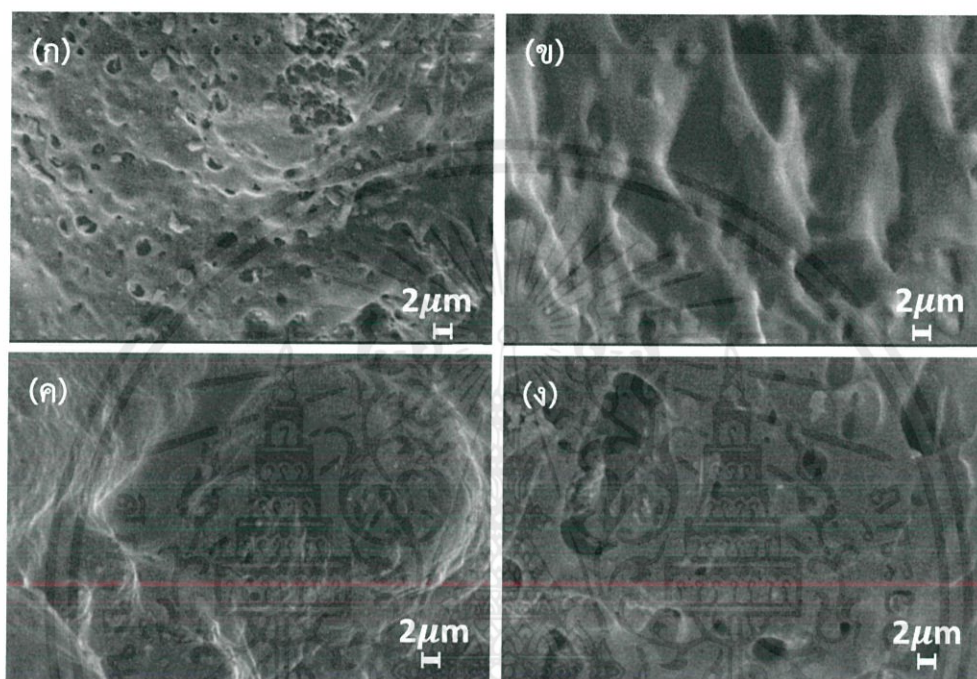
เมื่อนำน้ำตาลทรายซึ่งเป็นส่วนประกอบของซูโครสไปวิเคราะห์ค่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานและอุณหภูมิหลอมเหลวด้วยเครื่องมือดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ พบว่ามีค่าพลังงานในการเปลี่ยนวิภาค 255.85 J/g และช่วงอุณหภูมิการหลอมเหลว 146-246 องศาเซลเซียส แสดงได้ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ค่าพลังงานในการเปลี่ยนแปลงวิภาคและอุณหภูมิในการหลอมเหลวของน้ำตาลอินเวิร์ต

### 4.3 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยายขนาด 2000 เท่า แสดงลักษณะโครงสร้างของซี้เถ้าแกลบก่อนและหลังบรรจุเกลือหลอมเหลวไนเตรท พบว่าซี้เถ้าแกลบ มีขนาดของรูพรุน 2 ไมโครเมตร เมื่อหลังบรรจุเกลือหลอมเหลวไนเตรทสามองค์ประกอบเข้าไปแล้ว พบว่า เกลือที่บรรจุลงไปนั้นได้ไปสะสมบริเวณโครงสร้างรูพรุนภายในซี้เถ้าแกลบและปิดรูพรุนบริเวณ โครงสร้างภายนอกด้วย แสดงดังรูปที่ 4.6

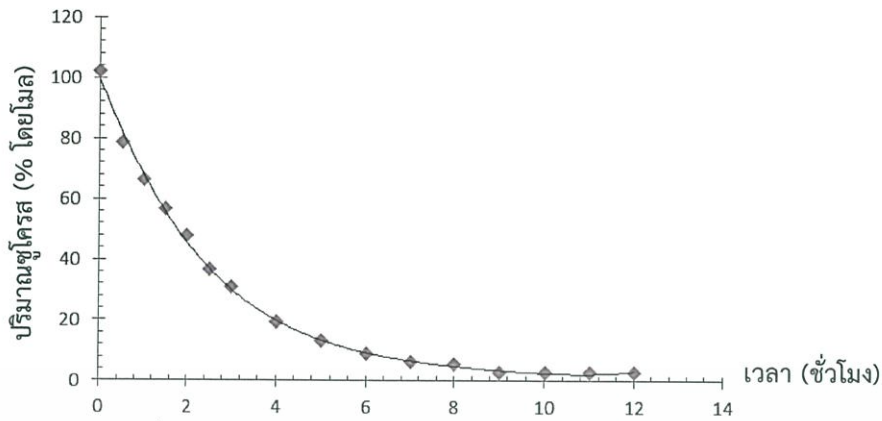


รูปที่ 4.6 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงลักษณะโครงสร้างของ (ก) พื้นผิวของซี้เถ้าแกลบ (ข) ภาพตัดขวางของซี้เถ้าแกลบ (ค) พื้นผิวของซี้เถ้าแกลบหลังบรรจุเกลือ (ง) ภาพตัดขวางของซี้เถ้าแกลบหลังบรรจุเกลือ

### 4.4 การวิเคราะห์สัดส่วนของน้ำตาลอินเวิร์ตที่เกิดขึ้นด้วยเครื่องโครมาโทกราฟีเหลวสมรรถนะสูง (HPLC)

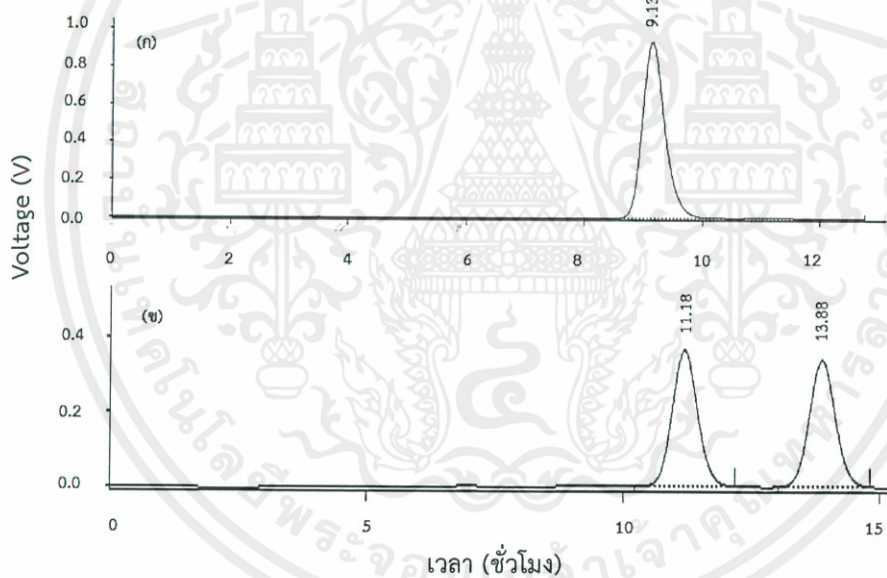
เมื่อทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสน้ำตาลทราย ให้ได้กลูโคสและฟรักโตสในอัตราส่วนโมลที่เท่ากัน 1:1 แล้วเพื่อเป็นการยืนยันว่าน้ำตาลทรายหรือซูโครสถูกสลายพันธะไกลโคไซด์แล้วทั้งหมด แยกออกเป็นกลูโคสและฟรักโตสในอัตราส่วนโมลที่เท่ากัน ทดสอบโดยใช้เครื่องโครมาโทกราฟีเหลวสมรรถนะสูง

จากรูปที่ 4.7 เมื่อนำน้ำตาลทรายมาทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส โดยมีกรดและความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าพันธะไกลโคไซด์จะถูกสลายอย่างรวดเร็วใน 4 ชั่วโมงแรกของการทำปฏิกิริยา แล้วหลังจากนั้น พันธะไกลโคไซด์ที่เหลืออยู่จะค่อยๆ ถูกสลาย และเมื่อเวลาผ่านไป 9 ชั่วโมง พันธะไกลโคไซด์จะถูกสลายหมดนั่นคือซูโครสสลายหมดไป กลายเป็นกลูโคสและฟรักโตสอัตราส่วนโมลที่เท่ากัน



รูปที่ 4.7 ปริมาณซูโครสกับเวลาในการทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส

จากผลโครมาโทกราฟีเหลวสมรรถนะสูง โดยใช้คอลัมน์ CARBOSEP Coregel-87C พบว่า สามารถแยกซูโครสออกมาที่เวลา 9.13 นาที และแยกกลูโคสและฟรักโทรสได้ที่เวลา 11.18 นาที และ 13.88 นาที ตามลำดับ ซึ่งได้กลูโคสและฟรักโทรสในอัตราส่วนโมลที่เท่ากัน แสดงผลก่อน-หลัง ทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่ดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 ผลโครมาโทกราฟีเหลวสมรรถนะสูง (ก) ก่อนทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (ข) ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส เมื่อผ่านไป 9 ชั่วโมง

#### 4.5 การเปรียบเทียบค่าพลังงานที่ได้จากวัสดุเปลี่ยนวัฏภาค

เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าพลังงานในการเปลี่ยนวัฏภาค ความหนาแน่นของสารและช่วงอุณหภูมิหลอมเหลว พบว่าเมื่อเปรียบเทียบบรรจุสารในภาชนะที่ 1 ลูกบาศก์เมตร แสดงในตารางที่ 4.2 สามารถแบ่งวัสดุเปลี่ยนวัฏภาคเป็น 2 กลุ่มนั่นคือระบบเกลือหลอมเหลวไนเตรทและน้ำตาล

#### 4.5.1 การเปรียบเทียบค่าพลังงานที่ได้จากระบบเกลือหลอมเหลวไนเตรท

พบเกลือหลอมเหลวไนเตรทสามองค์ประกอบมีความหนาแน่นของสารมากที่สุด จึงทำให้สามารถกักเก็บพลังงานความร้อนได้มากและช่วงอุณหภูมิการหลอมเหลวกว้าง เมื่อเทียบกับเกลือไนเตรทสามองค์ประกอบที่บรรจุลงในรูปของซิลิกา เนื่องจากตัวซีไล์เกลือมีความหนาแน่นที่ต่ำกว่าเกลือหลอมเหลวไนเตรทถึง 10 เท่า ทำให้ค่าพลังงานในการเปลี่ยนวิฤภาคมีค่าน้อยกว่า

แต่เมื่อเปรียบเทียบระหว่างเกลือไนเตรทสามองค์ประกอบที่บรรจุลงในรูปของซิลิกาได้ร้อยละ 21.16 โดยมวล และร้อยละ 31.69 โดยมวล พบว่ายิ่งบรรจุเกลือหลอมเหลวไนเตรทลงไป ในรูปของซิลิกาได้มาก ค่าพลังงานในการเปลี่ยนแปลงวิฤภาคก็จะเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย

#### 4.5.2 การเปรียบเทียบค่าพลังงานที่ได้จากระบบน้ำตาล

พบว่าน้ำตาลให้พลังงานการเปลี่ยนวิฤภาคการหลอมเหลวมากกว่าเกลือหลอมเหลวไนเตรทสามองค์ประกอบ แล้วน้ำตาลอินเวิร์ตให้พลังงานการเปลี่ยนวิฤภาคสูงกว่าน้ำตาลทราย เนื่องจากกลูโคสและฟรักโตสมีพลังงานในการเปลี่ยนวิฤภาคมากกว่าซูโครสและมีช่วงอุณหภูมิการหลอมเหลวที่กว้างกว่า

ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบค่าพลังงานที่ได้จากวัสดุเปลี่ยนวิฤภาค

ชนิดวัสดุเปลี่ยนวิฤภาค	ความสามารถกักเก็บพลังงานความร้อน (MJ/m <sup>3</sup> )	ความหนาแน่น (cm <sup>3</sup> /g)	ช่วงอุณหภูมิหลอมเหลว (°C)
เกลือหลอมเหลวไนเตรทสามองค์ประกอบ	157.56	2.08	150-240
เกลือไนเตรทสามองค์ประกอบที่บรรจุลงในรูปของซิลิกาได้ร้อยละ 21.14 โดยมวล	8.44	0.18	235-240
เกลือไนเตรทสามองค์ประกอบที่บรรจุลงในรูปของซิลิกาได้ร้อยละ 31.69 โดยมวล	10.91	0.28	235-245
น้ำตาลทราย	179.95	1.59	187-195
น้ำตาลอินเวิร์ต	413.19	1.62	146-246

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

##### 5.1.1 ระบบจัดเก็บพลังงานความโดยใช้วัสดุเกลือไนเตรทหลอมเหลว

จากการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้คุณสมบัติความเป็นรูปทรงของซิลิกาในซีเมนต์แก้วเพื่อกักเก็บเกลือหลอมเหลวไนเตรทที่ประกอบด้วยแคลเซียมไนเตรท โซเดียมไนเตรทและโพแทสเซียมไนเตรทที่สัดส่วนร้อยละ 36, 16 และ 48 โดยมวลตามลำดับและศึกษาความสามารถในการเก็บความร้อนและพลังงานในการเปลี่ยนวัฏภาคการหลอมเหลวของเกลือหลอมเหลวไนเตรทที่บรรจุในรูปทรงของซิลิกาจากซีเมนต์แก้ว พบว่า

1) ปริมาตรรูปทรงของซิลิกาในซีเมนต์แก้วมีขีดจำกัดในการบรรจุสารและเราไม่สามารถบรรจุสารลงไปเต็มปริมาตรรูปทรงที่มีอยู่ได้ จากการทดลองพบว่าสามารถบรรจุเกลือหลอมเหลวไนเตรทของซิลิกาจากซีเมนต์แก้วได้มากที่สุด 31.69 โดยมวล หรือ 63.82 โดยปริมาตร

2) ค่าพลังงานในการเปลี่ยนวัฏภาคจะลดลงเมื่อได้บรรจุเกลือหลอมเหลวไนเตรทสามองค์ประกอบเข้า เมื่อสามารถบรรจุเกลือหลอมเหลวไนเตรทสามองค์ประกอบในรูปทรงได้มากขึ้น ค่าพลังงานในการเปลี่ยนวัฏภาคจะเพิ่มมากขึ้นด้วยจาก 38.91 J/g เป็น 50.27 J/g ตามลำดับ

##### 5.1.2 ระบบจัดเก็บพลังงานความโดยใช้วัสดุน้ำตาลอินเวิร์ต

จากการศึกษาวัสดุเปลี่ยนวัฏภาคน้ำตาลอินเวิร์ตมีค่าพลังงานในการเปลี่ยนวัฏภาคมากกว่าน้ำตาลทรายเนื่องจากกลูโคสและฟรักโทสมีค่าพลังงานในการเปลี่ยนวัฏภาคมากกว่าซูโครส ซึ่งมีค่าพลังงานในการเปลี่ยนแปลงวัฏภาคของน้ำตาลทรายและน้ำตาลอินเวิร์ตพบว่ามีค่า 113.39 J/g และ 255.85 J/g ตามลำดับ

##### 5.1.3 เปรียบเทียบค่าพลังงานในการเปลี่ยนวัฏภาคระหว่างเกลือหลอมเหลวไนเตรทในรูปทรงซิลิกาจากซีเมนต์แก้วและน้ำตาลอินเวิร์ต

จากการเปรียบเทียบค่าพลังงานที่สามารถกักเก็บได้ของวัสดุเปลี่ยนวัฏภาคระหว่างระบบเกลือหลอมเหลวไนเตรทในรูปทรงซิลิกาจากซีเมนต์แก้วกับน้ำตาลอินเวิร์ต น้ำตาลอินเวิร์ตมีความเหมาะสมเป็นวัสดุเปลี่ยนวัฏภาคในระบบจัดเก็บพลังงานความร้อนมากกว่าเกลือหลอมเหลวไนเตรทในรูปทรงซิลิกาจากซีเมนต์แก้ว เนื่องจากน้ำตาลอินเวิร์ตมีความสามารถในการจัดเก็บพลังงานความร้อนมากกว่าเกลือหลอมเหลวไนเตรทในรูปทรงซิลิกาจากซีเมนต์แก้ว

การเลือกใช้วัสดุเปลี่ยนวัฏภาคต้องดูสภาวะที่เหมาะสมต่อกระบวนการที่เราต้องการนำไปใช้ โดยอาศัย 3 ปัจจัยหลัก ได้แก่ ความสามารถกักเก็บพลังงานความร้อน ความหนาแน่นและอุณหภูมิในการหลอมเหลวของวัสดุเปลี่ยนวัฏภาค

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

- ค่าพลังงานการเปลี่ยนแปลงวิภาค ซึ่งบอกถึงความสามารถในการจัดเก็บพลังงานและการเลือกใช้สารในช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมตรงกับความต้องการของกระบวนการได้
- ศึกษาวิธีการบรรจุเกลือหลอมเหลวในเตา ให้บรรจุเกลือได้เต็มปริมาตรรูปทรงของซีเมนต์แกลบ เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพการจัดเก็บพลังงานความร้อนได้สูงสุด
- ศึกษาเกลือในเตาสามองค์ประกอบที่บรรจุลงในรูปทรงของซิลิกา ว่าสามารถป้องกันการกัดกร่อนในระบบได้มากน้อยเพียงใด
- ศึกษาสร้างระบบแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีเกลือหลอมเหลวในเตา เกลือในเตาสามองค์ประกอบที่บรรจุลงในรูปทรงของซิลิกาจากซีเมนต์แกลบและน้ำตาลอินเวิร์ตเป็นของไหลถ่ายโอนความร้อน



## เอกสารอ้างอิง

- [1] D. Kearney, U. Herrmann, P. Nava, B. Kelly, R. Mahoney, J. Pacheco, et al. Assessment of a molten salt heat transfer fluid in a parabolic trough solar field. *J. Sol. Energy Eng.* **2003**, *125*, 170–176.
- [2] Joohyun Seo and Donghyun Shin. Size effect of nanoparticle on specific heat in a ternary nitrate ( $\text{LiNO}_3\text{--NaNO}_3\text{--KNO}_3$ ) salt eutectic for thermal energy storage. *Applied Thermal Engineering.* **2016**, *102*, 144–148.
- [3] Nicole Pflieger, Thomas Bauer, Claudia Martin, Markus Eck and Antje Wörner. Thermal energy storage – overview and specific insight into nitrate salts for sensible and latent heat storage. *Beilstein J. Nanotechnol.* **2015**, *6*, 1487–1497.
- [4] กัญยรัตน์ โทละสุด. 2551. วัสดุเปลี่ยนวัฏภาคเพื่อช่วยรักษาความร้อนในเครื่องอบพลังงานแสงอาทิตย์. ผลงานวิจัย การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 22.
- [5] IEA-ETSAP and IRENA. Thermal Energy Storage. *Thermal Energy Storage Technology Brief.* 2013, 14
- [6] Justin W. Raade<sup>1</sup> and David Padowitz. Development of molten salt heat transfer fluid with low melting point and high thermal stability. *J. Sol. Energy Eng.* **2011**, *133(3)*, 031013.
- [7] P.L. Lin, A. D. Pelton, and C. W. Bale. Computation of ternary molten salt phase diagrams. *J. American Ceramic Soc.* **1979**, vol. 62, no. 7-8, 414-422.
- [8] G. J. Janz et al.. *Physical properties data compilations relevant to energy storage*, NSRDS-NBS 61, parts I, II, and IV, **1981**.
- [9] R. W. Bradshaw and N. P. Siegel. Development of molten nitrate salt mixtures for concentrating solar power systems. *Solar PACES*, Berlin, Germany, paper no. 11538, proc. **2009**.
- [10] Donghyun Shin. Nanoparticle dispersion on ternary nitrate salts for heat transfer fluid applications in solar thermal power. *J. Heat Transfer.* **2016**, *138(5)*, 051901
- [11] Judith C. Gomez, Nicolas Calvet, Anne K. Starace, Greg C. Glatzmaier.  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2\text{--NaNO}_3\text{--KNO}_3$  molten salt mixtures for direct thermal energy storage systems in parabolic trough plants. *Journal of Solar Energy Engineering.* **2013**, *135*.
- [12] Stephen A. Nelson. Ternary Phase Diagrams. (Online). Available: <http://www.tulane.edu/~sanelson/eens212/ternaryphdiag.htm>. (accessed November 2016)

- [13] Steven Dutch. 2559. Ternary Eutectic System. (Online). Available: <https://www.uwgb.edu/dutchs/Petrology/Teutect.htm>. (accessed November 2016)
- [14] พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์. 2559. Invert sugar / น้ำตาลอินเวิร์ต. (ออนไลน์). <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/0910/invert-sugar>. 15 เมษายน 2560
- [15] Vimal Chandra Srivastava, Indra Deo Mall. Characterization of mesoporous rice husk ash (RHA) and adsorption kinetics of metal ions from aqueous solution onto RHA. *V.C. Srivastava et al. / Journal of Hazardous Materials B134*. 2006, 257–267.
- [16] D. Singh, R. Kumar, A. Kumar and K. N. Rai. Synthesis and characterization of rice husk silica, silica-carbon composite and H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> activated silica. *Cerâmica*. 2008, 54, 203-212
- [17] W. Nakbanpote, P. Thiraveetyan and C. Kalambaheti. Preconcentration of gold by rice husk ash. *Miner. Eng.* 2000, 13 (4), 391–400.
- [18] Nanosafety database. 2559. ซิลิกอนไดออกไซด์. (ออนไลน์). แหล่งที่มา: [http://web.eng.nu.ac.th/eng2012/cei/nanodatabase/info2.php?cat\\_id=5&p\\_id=167](http://web.eng.nu.ac.th/eng2012/cei/nanodatabase/info2.php?cat_id=5&p_id=167). 19 พฤศจิกายน 2559
- [19] Lu-di Zhang, XiaChen, Yu-tingWu, Yuan-weiLu and Chong-fangMaa. Effect of dispersion on enhancing the specific heat capacity of quaternary nitrate for solar thermal energy storage application. *Solar Energy Materials & Solar Cells*. 2016, 157, 808–813.
- [20] Joohyun Seo and Donghyun Shin. Size effect of nanoparticle on specific heat in a ternary nitrate (LiNO<sub>3</sub>–NaNO<sub>3</sub>–KNO<sub>3</sub>) salt eutectic for thermal energy storage. *Applied Thermal Engineering*. 2016, 102, 144–148.
- [21] Minna Hurta, Ilkka Pitkänen and Juha Knuutinen. Melting behaviour of D-sucrose, D-glucose and D-fructose. *Carbohydrate Research*. 2004, 339, 2267–2273
- [22] พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์. 2559. Differential scanning calorimeter. (ออนไลน์). แหล่งที่มา: <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/2606/differential-scanning-calorimeter>. 1 พฤษภาคม 2559
- [23] จีรนนท์ ชัยวาทธี. 2558. High performance liquid chromatography. (ออนไลน์). แหล่งที่มา: <http://web2.mfu.ac.th/center/stic/chromatograph-chemical-analysis-instrument-menu/item/126-high-performance-liquid-chromatography-hplc.html>. 1 พฤษภาคม 2559
- [24] สถาบันนวัตกรรมและพัฒนากระบวนการเรียนรู้ มหาลัยมหิดล. 2558. (ออนไลน์). แหล่งที่มา: <http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/nano/Page/Unit4-5.html>. 1 พฤษภาคม 2559



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

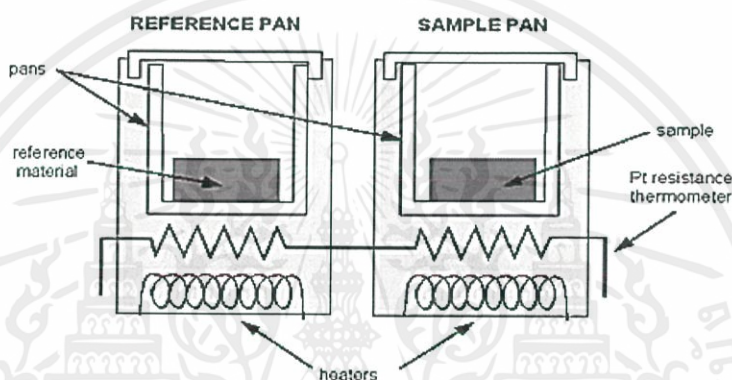


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ก.1 หลักการวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ [22]

ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์หรือ DSC เป็นแคลอริมิเตอร์ (Calorimeter) ซึ่งใช้วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อน (Thermal transition) ของสารตัวอย่างที่ใช้วัดการเปลี่ยนแปลงพลังงานการดูดหรือคายพลังงานของสารตัวอย่าง เมื่อถูกเพิ่มหรือลดอุณหภูมิ ในบรรยากาศที่ถูกควบคุม

หลักพื้นฐานของ DSC คือ นำเอา 2 ภาชนะ คือภาชนะบรรจุสารตัวอย่าง (Sample pan) และภาชนะอ้างอิง (Reference pan) ซึ่งเป็นภาชนะเปล่าวางอยู่ข้างกันไปวางอยู่บนอุปกรณ์ให้ความร้อนชนิดเดียวกัน เมื่อเริ่มการทดลองอุปกรณ์ให้ความร้อน จะเริ่มให้ความร้อนแก่ภาชนะทั้งสอง โดยเครื่อง DSC จะควบคุมอัตราการเพิ่มอุณหภูมิให้คงที่ โดยจะควบคุมให้ความร้อนแก่ทั้งสองที่วางแยกกัน ด้วยอัตราการเพิ่มความร้อนที่เท่ากันตลอดทั้งการทดลอง



รูปที่ ก.1 การทำงานเครื่องมือดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์

หลักการให้ความร้อน อุณหภูมิของภาชนะทั้งสองจะเพิ่มด้วยอัตราที่ไม่เท่ากัน เนื่องจากภาชนะบรรจุสารตัวอย่าง มีตัวอย่างอยู่ข้างใน แต่ภาชนะอ้างอิงการมีสารตัวอย่างอยู่ข้างในทำให้ภาชนะบรรจุสารตัวอย่าง มีสารในปริมาณที่มากกว่าภาชนะอ้างอิง นั้นหมายความว่าเตาหลอมต้องให้ความร้อนแก่ภาชนะบรรจุสารตัวอย่างมากกว่าที่ให้ภาชนะอ้างอิง เพื่อที่จะคงอัตราการเพิ่มอุณหภูมิให้เท่ากัน ดังนั้นเตาหลอมที่อยู่ใต้ภาชนะบรรจุสารตัวอย่าง จะต้องทำงานหนักกว่าเตาหลอมที่อยู่ใต้ภาชนะอ้างอิง เพราะต้องให้ความร้อนมากกว่าและการวัดความแตกต่างของปริมาณความร้อนจากเตาหลอมทั้งสองนี้ เป็นหน้าที่หลักของเครื่อง DSC และการแสดงผลคือการสร้างกราฟ โดยมีแกน X เป็นค่าของอุณหภูมิ และแกน Y เป็นค่าของความแตกต่างของปริมาณความร้อนของเตาหลอมทั้งสอง ณ อุณหภูมิใดอุณหภูมิหนึ่ง

โดยปกติแล้ว การทดสอบสารตัวอย่างทำโดยการเพิ่มหรือลดอุณหภูมิสารตัวอย่างด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิที่คงที่หรือการรักษาอุณหภูมิสารตัวอย่างไว้คงที่ (Isothermal) เป็นระยะเวลาหนึ่ง และสำหรับการทดลองส่วนใหญ่แล้ว บรรยากาศก็มีบทบาทสำคัญต่อผลการทดลองเช่นเดียวกับอุณหภูมิและอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ โดยส่วนใหญ่แล้วบรรยากาศที่ใช้ในการทดลองมีสองแบบคือ บรรยากาศเฉื่อยและบรรยากาศที่มีแก๊สออกซิเจน

ความร้อนที่ใส่สารตัวอย่าง (Heat flow) มีค่าสอดคล้องกับพลังงานที่ใส่สารตัวอย่างและถูกวัดในหน่วยมิลลิวัตต์ (Milliwatts; mW) เมื่อนำค่าพลังงานมาคูณด้วยเวลา ผลลัพธ์ที่ได้คือปริมาณ

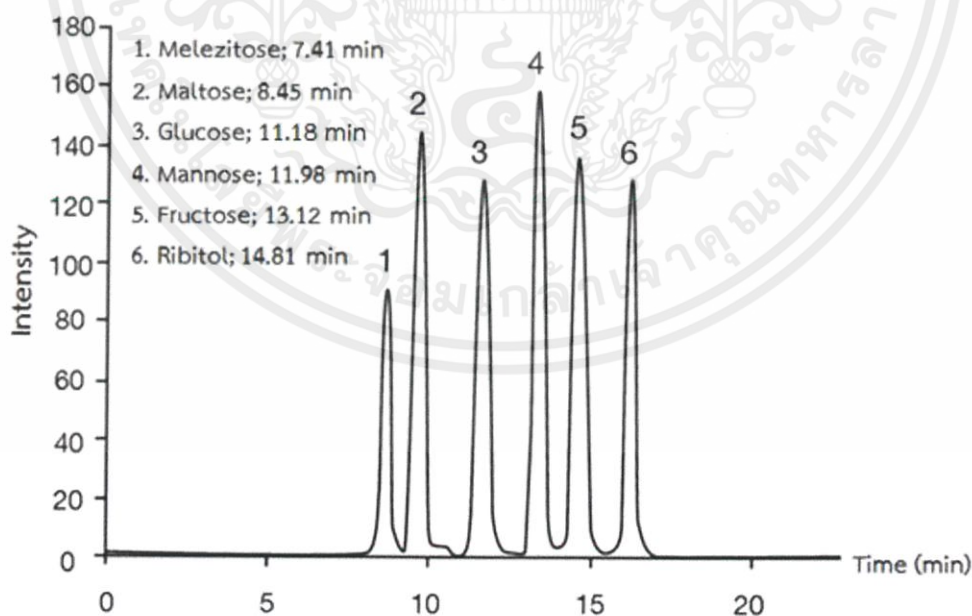
พลังงานที่ถูกแสดงในหน่วย มิลลิวัตต์วินาที (mW.s) หรือ มิลลิจูลล์ (mJ) พลังงานที่ให้สารตัวอย่างมีค่าสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของสารตัวอย่าง

เมื่อสารตัวอย่างมีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เช่น การหลอมเหลว เตาหลอมต้องให้ความร้อนแก่ที่บรรจุสารตัวอย่างมากกว่าที่ให้ภาตอ้างอิง เพื่อที่จะคุมอุณหภูมิของภาตที่บรรจุสารตัวอย่าง และภาตอ้างอิงให้เท่ากัน ความร้อนจะถูกส่งผ่านไปยังภาตที่บรรจุสารตัวอย่างมากกว่าหรือน้อยกว่าที่ถูกส่งผ่านไปยังภาตอ้างอิงนั้น ขึ้นอยู่กับว่าการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นนั้นเป็นแบบคายความร้อนหรือแบบดูดความร้อน

## ก.2 หลักการวิเคราะห์ด้วยเครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง [23]

เครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง (HPLC) ซึ่งอาศัยหลักการแยกสารเคมีภายใต้ความดันของเหลว นั้น เป็นเทคนิคในการวิเคราะห์สารตัวอย่างทั้งการวิเคราะห์เชิงคุณภาพ (Qualitative analysis) และเชิงปริมาณ (Quantitative analysis) HPLC ใช้วิธีการดูสารตัวอย่างที่ถูกทำให้เจือจางด้วยตัวทำละลายผ่านไปยังคอลัมน์ที่บรรจุสารอ้างอิงอยู่กับที่ สารละลายตัวอย่างจะเคลื่อนที่ผ่านคอลัมน์และเกิดปฏิกิริยากับสารที่บรรจุอยู่ การเกิดปฏิกิริยาเคมีจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของสารละลายตัวอย่าง เป็นเหตุให้แต่ละองค์ประกอบไหลผ่านคอลัมน์เข้าสู่เครื่องตรวจจับ (Detector) ด้วยเวลาที่แตกต่างกัน ความแตกต่างของสัญญาณที่วัดได้จะถูกแปลงออกมาในรูปแบบโครมาโทแกรม (Chromatogram) ในกรณีสารตัวอย่างที่ต้องการทดสอบประกอบด้วยอนุภาคของแข็ง จะต้องทำการแยกอนุภาคดังกล่าวออกก่อนทำการวิเคราะห์

คอลัมน์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ซูโครส กลูโคสและฟรุกโตสใช้คอลัมน์ CARBOSEP Coregel-87C ซึ่งสภาวะในการใช้คอลัมน์คือที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส เฟสเคลื่อนที่ (Mobile phase) ใช้น้ำ DI ความดันอยู่ในช่วง 426.8-455.2 psi และอัตราการไหล 0.6 มิลลิลิตร/นาที

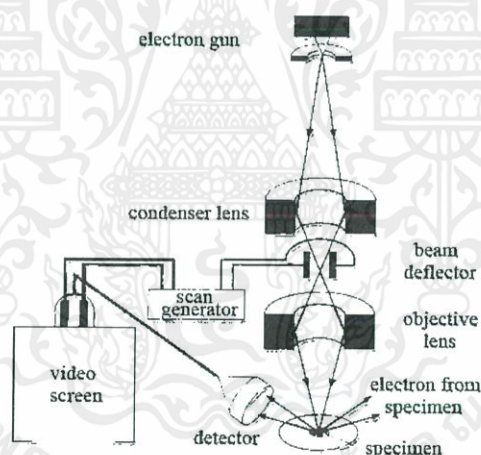


รูปที่ ก.2 การแยกสารของคอลัมน์ CARBOSEP Coregel-87C

### ก.3 หลักการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [24]

เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายไม่สูงเท่ากับเครื่อง TEM (เครื่อง SEM มีกำลังขยายสูงสุดประมาณ 10 นาโนเมตร) การเตรียมตัวอย่างเพื่อที่จะดูด้วยเครื่อง SEM นี้ไม่จำเป็นต้องที่ตัวอย่างจะต้องมีขนาดบางเท่ากับเมื่อดูด้วยเครื่อง TEM การสร้างภาพทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของตัวอย่างที่ทำการสำรวจ ซึ่งภาพที่ได้จากเครื่อง SEM นี้จะเป็นภาพลักษณะของ 3 มิติ ดังนั้นเครื่อง SEM จึงถูกนำมาใช้ในการศึกษาสัณฐานและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง เช่น ลักษณะพื้นผิวด้านนอกของเนื้อเยื่อและเซลล์ หน้าที่ดของโลหะและวัสดุ เป็นต้น

หลักการทำงานของเครื่อง จะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวมรังสี เพื่อให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ หากต้องการภาพที่มีความคมชัดจะปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุลงไปยังผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษา หลังจากลำอิเล็กตรอนถูกกราดลงบนชิ้นงานจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิขึ้น ซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึก จากนั้นแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์แล้วถูกนำไปสร้างเป็นภาพบนจอโทรทัศน์



รูปที่ ก.3 ส่วนประกอบและการทำงานของเครื่อง SEM



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ข.1 ปริมาณเกลือหลอมเหลวในเตรทที่บรรจุในซิลิกาจากซีเถ้าแกลบ

ปริมาตรรุกรุ่นของโครงสร้างซิลิกาจากซีเถ้าแกลบมีขนาด  $0.35 \text{ cm}^3/\text{g}$  คือซีเถ้าแกลบ 1 กรัม สามารถบรรจุสารได้ 0.75 ลูกบาศก์เซนติเมตร นั่นคือสามารถบรรจุเกลือหลอมเหลวในเตรทที่ประกอบด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมไฮดรอกไซด์และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่สัดส่วนร้อยละ 36, 16 และ 48 โดยมวลตามลำดับ ซึ่งเกลือหลอมเหลวในเตรทที่มีความหนาแน่นเท่ากับ  $2.077 \text{ cm}^3/\text{g}$  ที่ปริมาตร 0.35 ลูกบาศก์เซนติเมตร สามารถบรรจุเกลือหลอมเหลวในเตรท 0.7269 กรัม

ตารางที่ ข.1 ข้อมูลการบรรจุเกลือในเตรทลงในรุกรุ่นซิลิกอนไดออกไซด์จากซีเถ้าแกลบ

รายการ	การทดลองที่ 1	การทดลองที่ 2
<b>ส่วนผสมของเกลือหลอมเหลวในเตรท</b>		
- แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (กรัม)	16.26	16.30
- โซเดียมไฮดรอกไซด์ (กรัม)	7.59	7.51
- โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (กรัม)	26.61	26.73
- กรดไนตริก (กรัม)	100.18	100.36
น้ำหนักซีเถ้าแกลบก่อนบรรจุเกลือ (กรัม)	1	1
น้ำหนักซีเถ้าแกลบหลังบรรจุเกลือ (กรัม)	1.268	1.464
เกลือที่บรรจุในรุกรุ่นซีเถ้าแกลบ (กรัม)	0.268	0.464
เกลือที่บรรจุได้ ร้อยละโดยมวล	21.13	31.69
เกลือที่บรรจุได้ ร้อยละโดยปริมาตร	36.87	63.82

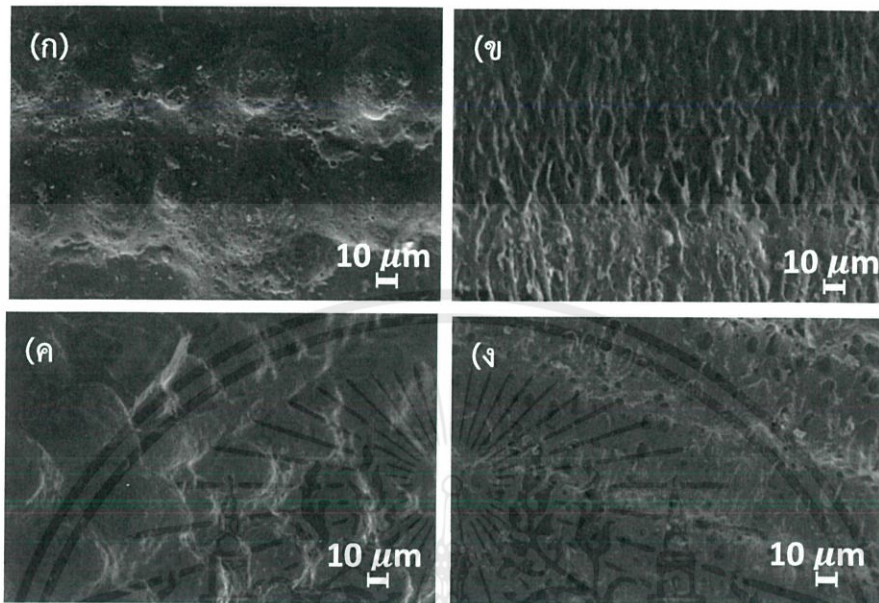
### ข.2 ค่าพลังงานความร้อนของการเปลี่ยนวัฏภาคและอุณหภูมิหลอมเหลวด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์

ตารางที่ ข.2 ผลข้อมูลจากการใช้เครื่องมือวิเคราะห์เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์

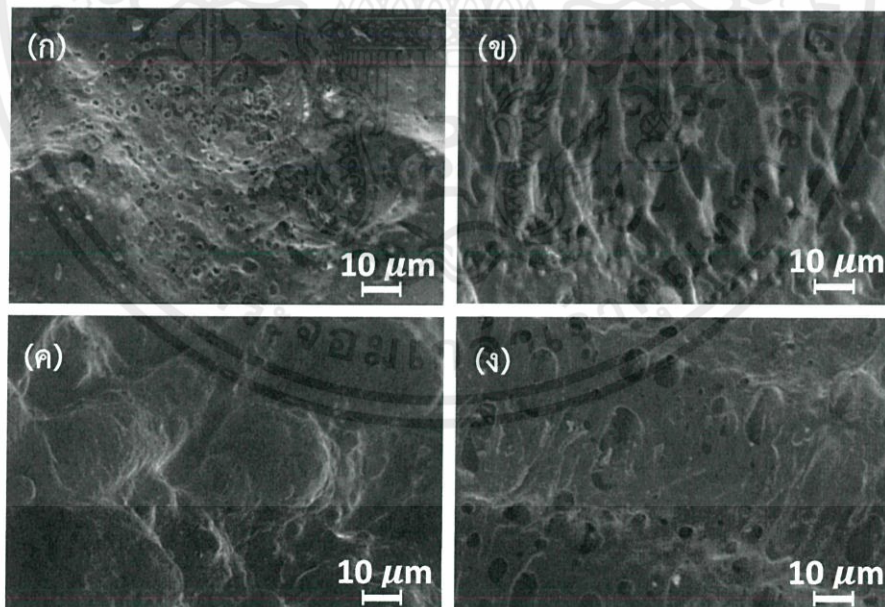
ชนิดวัสดุเปลี่ยนวัฏภาค	Area (J/g)	Peak ( $^{\circ}\text{C}$ )	Onset ( $^{\circ}\text{C}$ )	End ( $^{\circ}\text{C}$ )
เกลือหลอมเหลวในเตรทสามองค์ประกอบ	75.86	221.3	183.8	240.0
เกลือในเตรทที่บรรจุลงในรุกรุ่นของซิลิกาได้ร้อยละ 21.14 โดยมวล	38.91	240.3	238.6	244.7
เกลือในเตรทที่บรรจุลงในรุกรุ่นของซิลิกาได้ร้อยละ 31.69 โดยมวล	50.27	237.3	235.9	240.7
น้ำตาลทราย	113.39	192.50	187.76	195.28
น้ำตาลอินเวิร์ต	255.85	213.83	146.30	246.29

### ข.3 ลักษณะทางกายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

แสดงลักษณะโครงสร้างเพิ่มเติมของซี้ไถ้แก่ลบกก่อนและหลังบรรจุเกลือหลอมเหลวไนเตรท ที่กำลังขยายขนาด 500 เท่า และ 1000 เท่า



รูปที่ ข.1 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ขนาดกำลังขยาย 500 เท่า แสดงลักษณะโครงสร้างของ (ก) พื้นผิวของซี้ไถ้แก่ลบก (ข) ภาพตัดขวางของซี้ไถ้แก่ลบก (ค) พื้นผิวของซี้ไถ้แก่ลบกหลังบรรจุเกลือ (ง) ภาพตัดขวางของซี้ไถ้แก่ลบกหลังบรรจุเกลือ



รูปที่ ข.2 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ขนาดกำลังขยาย 1000 เท่า แสดงลักษณะโครงสร้างของ (ก) พื้นผิวของซี้ไถ้แก่ลบก (ข) ภาพตัดขวางของซี้ไถ้แก่ลบก (ค) พื้นผิวของซี้ไถ้แก่ลบกหลังบรรจุเกลือ (ง) ภาพตัดขวางของซี้ไถ้แก่ลบกหลังบรรจุเกลือ

#### ข.4 ผลของสัดส่วนน้ำตาลอินเวิร์ตที่เกิดขึ้นด้วยเครื่องโครมาโทกราฟีเหลวสมรรถนะสูง

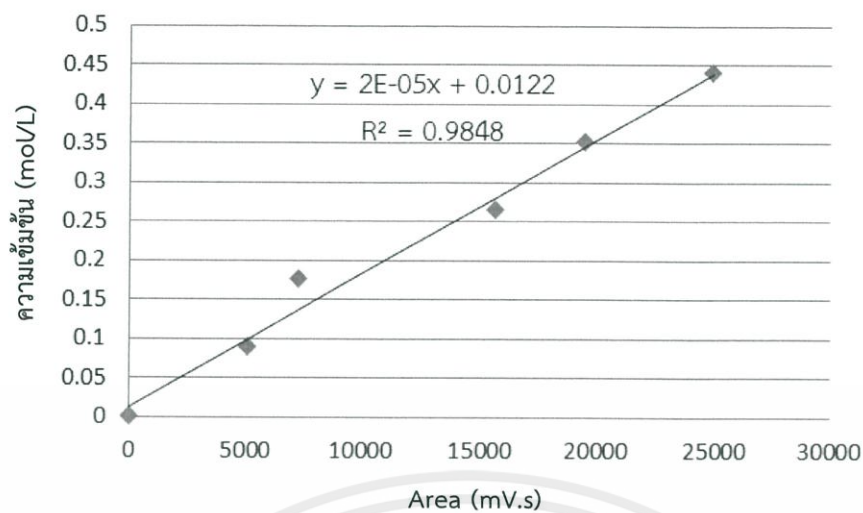
ตารางที่ ข.3 ผลข้อมูลจากการใช้เครื่องมือวิเคราะห์เครื่องโครมาโทกราฟีเหลวสมรรถนะสูงของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสน้ำตาลทราย

เวลา (ชั่วโมง)	Area (mV.s)		
	ซูโครส	กลูโคส	ฟรักโทส
0.0	24,901.675	-	-
0.5	18,977.898	2,112.183	1,753.696
1.0	15,873.760	3,875.190	3,539.240
1.5	13,451.820	5,103.614	4,958.106
2.0	11,249.278	6,777.808	6,545.309
2.5	8,532.945	7,405.502	7,348.091
3.0	7,074.203	8,653.914	8,218.244
4.0	4,118.785	9,536.150	8,918.988
5.0	2,606.873	10,643.133	9,943.084
6.0	1,555.200	10,706.959	10,014.267
7.0	890.323	10,483.416	9,722.413
8.0	655.962	11,526.528	10,729.098
9.0	-	12,968.774	11,875.447
10.0	-	12,875.645	11,612.322
11.0	-	12,912.533	11,758.971

การเตรียมน้ำตาลทรายเป็นละลายอิมิตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ 60 โดยมวล มีความเข้มข้น 4.386 โมลาร์ ทำกราฟความเข้มข้นมาตรฐานดังตารางที่ ข.4 และรูปที่ ข.3

ตารางที่ ข.4 ผลข้อมูลจากการใช้เครื่องมือวิเคราะห์เครื่องโครมาโทกราฟีเหลวสมรรถนะสูง ทำเป็นกราฟความเข้มข้นมาตรฐานของน้ำตาลทรายหรือซูโครส

ปริมาตรสาร (มิลลิลิตร) ที่นำมาปรับปริมาตรให้เป็น 10 มิลลิลิตร	Area (mV.s)	ความเข้มข้นสารละลายที่ได้ (โมลาร์)
1	24,901.675	0.4386
0.8	19,501.703	0.3509
0.6	15,640.451	0.2632
0.4	7,297.623	0.1754
0.2	5,064.927	0.0877
0.0	-	0



รูปที่ ข.3 กราฟความเข้มข้นมาตรฐานของน้ำตาลทราย

