

ผลของลำดับการผสมวัสดุติดต่อประสิทธิภาพการใช้พลังงานในการหลอมแก้ว



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์เพื่ออุตสาหกรรม ไม่สังกัดภาควิชา/เทียบเท่า  
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2563  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Effect of Batch Mixing Sequences on Energy Efficiency of Melting Process



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Science in Science for Industry

Common Course

FACULTY OF SCIENCE

Chulalongkorn University

Academic Year 2020

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของลำดับการผสมวัสดุคืบต่อประสิทธิภาพการใช้พลังงานในการหลอมแก้ว
โดย	น.ส.ปริณาพรรณ ปิ่นหอม
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์เพื่ออุตสาหกรรม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ดร.อภิรัฐ อีระภาวิเศษพงษ์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริฉันทน์ เจียมศิริเลิศ

---

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ประธานกรรมการ
.....	
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธิตี บวรรัตนารักษ์)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ดร.อภิรัฐ อีระภาวิเศษพงษ์)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริฉันทน์ เจียมศิริเลิศ)	
.....	กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กานต์ เสรีวัลย์สถิตย์)	
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.อนุชา วรรณก้อน)	

ปริญาพรรณ ปิ่นหอม : ผลของลำดับการผสมวัตถุดิบต่อประสิทธิภาพการใช้พลังงานในการหลอมแก้ว. ( Effect of Batch Mixing Sequences on Energy Efficiency of Melting Process) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ดร.อภิรัฐ ธีรภาพวิเศษพงษ์, อ.ที่ปรึกษาร่วม : รศ. ดร.ศิริธันว์ เจียมศิริเลิศ

โดยทั่วไปกระบวนการหลอมแก้วระดับอุตสาหกรรมต้องการพลังงานสูงสำหรับการเปลี่ยนแปลงจากวัตถุดิบเป็นน้ำแก้ว วัตถุประสงค์ในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงการพัฒนากระบวนการหลอมแก้วโซดาไลม์โดยวิธีปรับลำดับการผสมในระดับห้องปฏิบัติการ ซึ่งอาศัยกลไกของปฏิกิริยาสถานะของแข็งระหว่างทรายแก้วและโซเดียมคาร์บอเนตในช่วงแรกของการหลอม การเตรียมส่วนผสมแบบดั้งเดิมเป็นการผสมวัตถุดิบทั้งหมดภายในครั้งเดียว ในงานวิจัยนี้ต้องการปรับเปลี่ยนวิธีการเตรียมส่วนผสมให้เหมาะสมที่สุดต่อการหลอมโดยการปรับลำดับของการผสม ประกอบด้วยสองขั้นตอนการผสม ขั้นตอนแรกคือการผสมทรายแก้วและโซเดียมคาร์บอเนต จากนั้นจึงผสมวัตถุดิบที่เหลือเป็นขั้นตอนที่สอง เพื่อเปรียบเทียบและศึกษาผลของการเตรียมส่วนผสมทั้งสองวิธี ได้ทำการศึกษาสภาพและการเปลี่ยนแปลงระหว่างกระบวนการหลอมที่อุณหภูมิตั้งแต่ 600 ถึง 1000 องศาเซลเซียส นอกจากนี้มีผลของปริมาณวัตถุดิบที่หลอมไม่หมดบนพื้นผิวซึ่งยังคงหลงเหลือในสภาพผลึก ณ สภาวะที่กำหนด เพื่อเปรียบเทียบแนวโน้มประสิทธิผลในการหลอมของส่วนผสมจากการผสมสองวิธี โดยภาพถ่ายผิวหน้าและโดยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ผลการวิจัยพบว่าการจัดลำดับการผสมเป็นวิธีการผสมที่เหมาะสมกว่าส่งผลต่ออัตราการหลอม พื้นผิวสัมผัสที่เพิ่มขึ้นระหว่างทรายแก้วและโซเดียมคาร์บอเนตจากการผสมขั้นตอนแรกนำไปสู่การเพิ่มอัตราการหลอมของทั้งระบบ ต่างจากวิธีการเดิมที่อาจมีวัตถุดิบอื่นเป็นตัวขัดขวางการเกิดปฏิกิริยาสถานะของแข็งดังกล่าว

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์เพื่ออุตสาหกรรม	ลายมือชื่อนิสิต .....
ปีการศึกษา	2563	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....
		ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม .....

# # 6270219623 : MAJOR SCIENCE FOR INDUSTRY

KEYWORD: batch mixing, glass melting, fluxing, glass formation, energy reduction

Preenapun Pinhorn : Effect of Batch Mixing Sequences on Energy Efficiency of Melting Process. Advisor: APIRAT THEERAPAPVISETPONG, Ph.D. Co-advisor: Assoc. Prof. SIRITHAN JIEMSIRILERS, Ph.D.

Glass furnaces usually need high energy consumption for batch-to-glass conversion process, what if the industry improves rate of batch-to-melt conversion from mechanism of silica sand and sodium carbonate as fluxing agent on state of solid-state reaction and sand dissolution process. While the conventional batch preparation method is a mixing all raw materials in one time. In this work, batch preparation method was optimized by adjusting the sequence of batch mixing. The sequence of batch preparation was composed of two mixing steps. The first step was a mixing of silica sand and sodium carbonate. Then the rest of raw materials were added to mix as the second step. To investigate the effects of different preparation methods, both conditions; conventional and sequential glass batches were studied their melting ability at the temperature from 600 to 1,000 °C. The undissolved materials and melted glass ratio on the surface were observed and calculated by using visualization. The crystalline and glassy phase were determined using X-ray diffraction analysis. The results found that the sequential batch of preparation method was the optimum condition. The closed contact of silica sand and fluxing agent particle in the first mixing step promoted the increasing of melting rate. This experiment intends to persuade the glass manufacturing to improve the preparation method to reduce reaction time of glass batch and energy requirement in this process.

Field of Study: Science for Industry

Student's Signature .....

Academic Year: 2020

Advisor's Signature .....

Co-advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างสมบูรณ์ด้วยความกรุณาอย่างยิ่งจากอาจารย์ ดร. อภิรัฐ ธีรภาพวิเศษพงษ์ และรองศาสตราจารย์ ดร. ศิริธันว์ เจียมศิริเลิศ ที่ได้สละเวลาอันมีค่า เพื่อให้คำปรึกษาและแนะนำ ตลอดจนตรวจทานแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความเอาใจใส่เป็นอย่างยิ่ง ผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ต่าง ๆ อันผู้เขียนมิได้เอ่ยนาม ที่ได้อบรมสั่งสอนให้ความรู้ทางด้านวิชาการแก่ผู้เขียน รวมทั้งได้แต่งตำราให้ผู้เขียนได้ใช้ค้นคว้า อ้างอิง จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้

ขอขอบพระคุณบริษัท บีจี คอนเทนเนอร์ กลาส จำกัด (มหาชน) ที่ให้โอกาสในการศึกษาต่อ และสนับสนุนทุนวิจัย รวมถึงทรัพยากรเพื่อส่งเสริมในด้านต่าง ๆ เพื่อให้งานวิจัยสำเร็จ ผู้วิจัยซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่งที่บริษัทเล็งเห็นถึงความสำคัญของการสร้างนวัตกรรมและองค์ความรู้ เพื่อนำไปใช้ในการดำเนินงานจริง นอกจากนี้ขอขอบพระคุณบุคลากรที่เกี่ยวข้องทุกท่านในความกรุณาเมตตาช่วยเหลือ ให้คำปรึกษา และข้อแนะนำระหว่างการทำวิจัยฉบับนี้

ขอขอบพระคุณโครงการวิทยาศาสตร์เพื่ออุตสาหกรรม (Sci-FI) คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำนักงานสภานโยบายการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรมแห่งชาติ (สอวช.) และ สำนักงานวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) โดย ITAP ในการจัดทำโครงการที่คำนึงถึงความเชื่อมโยงของการศึกษาต่อการดำเนินงานในภาคอุตสาหกรรม

ขอขอบพระคุณบิดามารดา และมิตรสหายทุกท่านที่ให้การสนับสนุนมาโดยตลอด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ปรีณาพรรณ ปิ่นหอม

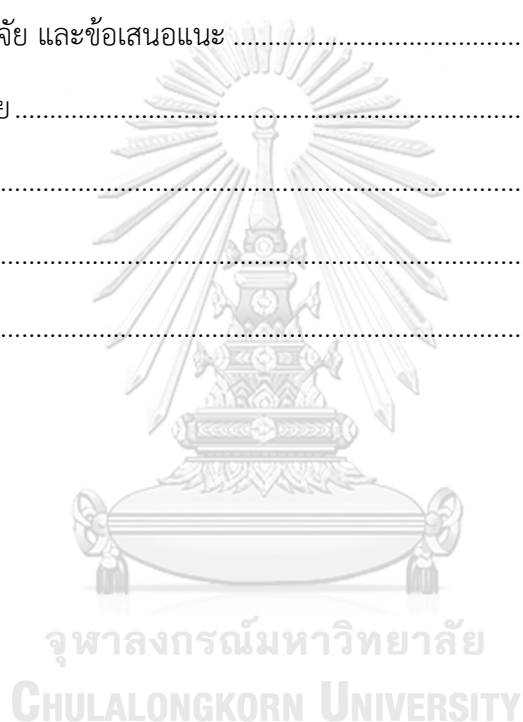
## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญรูปภาพ.....	ฅ
สารบัญตาราง.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ที่มาและเหตุผล .....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตการดำเนินงาน.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	3
2.1 กระบวนการในอุตสาหกรรมการผลิตบรรจุภัณฑ์แก้ว.....	3
2.1.1 การเตรียมวัตถุดิบในการหลอมแก้ว .....	3
2.1.2 กระบวนการผสมวัตถุดิบ .....	3
2.1.3 กระบวนการหลอม .....	3
2.1.4 กระบวนการขึ้นรูป.....	4
2.1.5 กระบวนการอบอ่อน.....	4
2.1.6 กระบวนการควบคุมคุณภาพและบรรจุ.....	4
2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง .....	4
2.2.1 วัตถุดิบ .....	4

2.2.2 ปฏิกริยาในกระบวนการหลอมแก้ว .....	7
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	9
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย .....	12
3.1 วัตถุประสงค์และสารเคมีที่ใช้การทดลอง .....	12
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง .....	12
3.3 ขั้นตอนการทดลอง .....	13
3.4.1 ทดสอบความเป็นเนื้อเดียวกันของกระบวนการผสมปัจจุบัน.....	13
3.4.2 การวิเคราะห์ Glass grade .....	14
3.4.3 การเตรียมวัตถุดิบและการหลอมแก้ว ระดับห้องปฏิบัติการ.....	17
3.4.3 วิเคราะห์สมบัติทางเฟสของผลึกที่คงเหลืออยู่ โดยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD: X-ray Fluorescence Diffraction).....	18
3.4.4 วิเคราะห์สมบัติการเปลี่ยนแปลงทางความร้อน โดยเทคนิคการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อน.....	18
3.4.5 ทดลองหลอมแบบจัดลำดับการผสม ระดับอุตสาหกรรม.....	19
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล .....	21
4.1 การทดสอบความเป็นเนื้อเดียวกันของกระบวนการผสมปัจจุบัน .....	21
4.2 ทดลองการหลอมแก้วระดับห้องปฏิบัติการ และวัดผลเบื้องต้น .....	23
4.2.1 ผลการผสมจากเครื่องผสมระดับห้องปฏิบัติการ.....	23
4.2.2 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการหลอม.....	23
4.2.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสเบื้องต้น .....	25
4.3 ทดลองหา Batch free time.....	25
4.5 การวิเคราะห์สมบัติทางเฟสของผลึกที่คงเหลืออยู่ โดยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD: X-ray Fluorescence Diffraction).....	29



4.6 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน โดยเทคนิคการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อน (DTA: Differential Thermal Analysis) และเทคนิคการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเนื่องจากความร้อน (TGA: Thermogravimetric Analysis).....	32
4.6.1 การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของระหว่างวัตถุบสองชนิด.....	32
4.6.2 การเปรียบเทียบสมบัติทางความร้อนของส่วนผสมที่เตรียมด้วยวิธีปกติและจัดลำดับการผสม .....	35
4.3 ทดลองหลอมแบบจัดลำดับการผสมระดับอุตสาหกรรม .....	45
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ .....	47
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	47
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	47
บรรณานุกรม.....	48
ประวัติผู้เขียน.....	52



## สารบัญรูปภาพ

ภาพที่ 2.1	โครงสร้างอัญฐานของซิลิกาบริสุทธิ์ และเมื่อมีการเติม $\text{Na}^+$ เพื่อเป็น Fluxing agent ..	5
ภาพที่ 2.2	แผนภาพขั้นตอนการหลอม ณ อุณหภูมิต่าง ๆ.....	8
ภาพที่ 2.3	แผนภาพของกระบวนการหลอมแก้ว .....	8
ภาพที่ 2.4	ภาพตัดขวางของเตาหลอม แสดง Batch blanket และทิศทางกระแสไหลวนของน้ำแก้ว	9
ภาพที่ 2.5	การศึกษาการเกิดปฏิกิริยาระหว่างอนุภาคทราย โซดาแอช และหินปูน .....	11
ภาพที่ 3.1	แผนผังแสดงขั้นตอนการทดสอบความเป็นเนื้อเดียวกันของส่วนผสม .....	13
ภาพที่ 3.2	แผนผังแสดงขั้นตอนการทดสอบความเป็นเนื้อเดียวกันของเนื้อแก้ว .....	14
ภาพที่ 3.3	การคำนวณหาพลังงานกระตุ้น.....	18
ภาพที่ 3.4	แผนภาพการผสมวัตถุดิบของเตาหลอม A .....	19
ภาพที่ 4.1	ผลวิเคราะห์การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของการผสม 1 ครั้ง.....	22
ภาพที่ 4.2	ผลวิเคราะห์การกระจายตัวของอนุภาคของการผสม 1 วัน .....	22
ภาพที่ 4.3	เครื่องผสมแบบหมุน Overhead รอบการหมุน 30 รอบต่อนาที และตัวอย่างส่วนผสม.	23
ภาพที่ 4.4	ผลวิเคราะห์รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ แสดงองค์ประกอบทางเฟสจากบริเวณผิวหน้าของตัวอย่างจากสองวิธีการผสม พบเฟสไตรดีไมต์ และควอตซ์ ที่ยังหลอมไม่หมด .....	25
ภาพที่ 4.5	แสดงผลบนผิวหน้าเข้าหลอมจากการทดสอบ Batch-free time.....	26
ภาพที่ 4.6	ผลการทดสอบบนผิวหน้าเข้าหลอม.....	28
ภาพที่ 4.7	ผลวิเคราะห์รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ แสดงองค์ประกอบเฟสของส่วนผสมจากการผสมแบบดั้งเดิม ที่อุณหภูมิต่าง ๆ .....	29
ภาพที่ 4.8	ผลวิเคราะห์รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ แสดงองค์ประกอบเฟสของส่วนผสมจากการผสมแบบจัดลำดับ ที่อุณหภูมิต่าง ๆ .....	30
ภาพที่ 4.9	สัดส่วนระหว่างผลึกและอัญฐานจากตัวอย่างของการทดสอบ Batch-free time .....	31
ภาพที่ 4.10	กราฟ DTA ของ 2 องค์ประกอบ ระหว่างทรายกับวัตถุดิบอื่น ๆ .....	33
ภาพที่ 4.11	กราฟ TGA ของ 2 องค์ประกอบ ระหว่างทรายกับวัตถุดิบอื่น ๆ .....	33

ภาพที่ 4.12 กราฟ DTA ของ 2 องค์ประกอบ ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่เกิดปฏิกิริยาในสถานะของแข็ง .....	34
ภาพที่ 4.13 กราฟ TGA ของ 2 องค์ประกอบ ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่เกิดปฏิกิริยาในสถานะของแข็ง .....	35
ภาพที่ 4.14 กราฟ DSC ของส่วนผสมทั้งหมด คือ ทราาย โซดาแอช หินฟ้าน้ำ หินปูน และโดโลไมต์ ที่อัตราการให้ความร้อน 5 องศาเซลเซียสต่อนาที.....	36
ภาพที่ 4.15 กราฟ DSC ของส่วนผสมที่อัตราการให้ความร้อน 5 องศาเซลเซียสต่อนาที แบบขยายที่ ช่วงอุณหภูมิ 625 – 700 องศาเซลเซียส เพื่อหาจุด onset.....	37
ภาพที่ 4.16 กราฟ DSC ของส่วนผสมที่อัตราการให้ความร้อน 5 องศาเซลเซียสต่อนาที แบบขยายที่ ช่วงอุณหภูมิ 700 – 775 องศาเซลเซียส เพื่อหาจุดพีคของการเปลี่ยนแปลงแบบดูดความร้อน .....	37
ภาพที่ 4.17 กราฟ DSC ของส่วนผสมทั้งหมด คือ ทราาย โซดาแอช หินฟ้าน้ำ หินปูน และโดโลไมต์ ที่อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที .....	38
ภาพที่ 4.18 กราฟ DSC ของส่วนผสม อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที แบบขยายที่ ช่วงอุณหภูมิ 625 – 700 องศาเซลเซียส เพื่อหาจุด onset.....	39
ภาพที่ 4.19 กราฟ DSC ของส่วนผสม อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที แบบขยายที่ ช่วงอุณหภูมิ 725 – 800 องศาเซลเซียส เพื่อหาจุดพีคของการเปลี่ยนแปลงแบบดูดความร้อน .....	39
ภาพที่ 4.20 กราฟ DSC ของส่วนผสมทั้งหมด คือ ทราาย โซดาแอช หินฟ้าน้ำ หินปูน และโดโลไมต์ ที่อัตราการให้ความร้อน 15 องศาเซลเซียสต่อนาที .....	40
ภาพที่ 4.21 กราฟ DSC ของส่วนผสม อัตราการให้ความร้อน 15 องศาเซลเซียสต่อนาที แบบขยาย ที่ช่วงอุณหภูมิ 650 – 750 องศาเซลเซียส เพื่อหาจุด onset .....	41
ภาพที่ 4.22 กราฟ DSC ของส่วนผสม อัตราการให้ความร้อน 15 องศาเซลเซียสต่อนาที แบบขยายที่ ช่วงอุณหภูมิ 725 – 825 องศาเซลเซียส เพื่อหาจุดพีคของการเปลี่ยนแปลงแบบดูดความร้อน .....	41
ภาพที่ 4.23 กราฟ Ozawa ของจุดเริ่มเกิดปฏิกิริยา.....	42
ภาพที่ 4.24 กราฟ Ozawa ของจุดพีคของการเปลี่ยนแปลงแบบดูดความร้อน .....	43
ภาพที่ 4.25 กราฟ Kissinger ของจุดเริ่มเกิดปฏิกิริยา.....	43
ภาพที่ 4.26 กราฟ Kissinger ของจุดพีคของการเปลี่ยนแปลงแบบดูดความร้อน .....	44

**สารบัญตาราง**

ตารางที่ 3.1 ระบุ factor จากจำนวนเส้นที่พบในชิ้นงานตัวอย่าง..... 15

ตารางที่ 3.2 ระบุ Equivalent Retardation จากสีที่พบในชิ้นงานตัวอย่าง..... 15

ตารางที่ 3.3 ระบุ Glass grade จาก Factor และ Equivalent Retardation ..... 16

ตารางที่ 3.4 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุดิบแต่ละชนิด ..... 17

ตารางที่ 3.5 เปรียบเทียบเวลาของแต่ละขั้นตอนการผสม ของวิธีผสมแบบดั้งเดิมและแบบจัดลำดับ 20

ตารางที่ 4.1 ตัวอย่างการแจ้งระดับความเป็นเนื้อเดียวกันเนื้อแก้ว (Glass grade) จากกระบวนการควบคุมคุณภาพ..... 23

ตารางที่ 4.2 ภาพตัดขวางของเนื้อแก้วส่องผ่านกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงโพลาไรซ์ ..... 24

ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบสัดส่วนการหลอมจากการคำนวณผิวหน้าแก้ว โดยฟังก์ชัน Measurement Log โปรแกรมโฟโตช็อป..... 24

ตารางที่ 4.4 ค่าพลังงานกระตุ้นจากการคำนวณและแปลงด้วยวิธีของ Ozawa ..... 44

ตารางที่ 4.5 ค่าพลังงานกระตุ้นจากการคำนวณและแปลงด้วยวิธี Kissinger ..... 44

ตารางที่ 4.6 ข้อมูลการใช้พลังงานเปรียบเทียบระหว่างช่วงที่ผสมแบบดั้งเดิมกับแบบจัดลำดับ ..... 45

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ที่มาและเหตุผล

บริษัท บีจี คอนเทนเนอร์กลาส จำกัด (มหาชน) หรือ บีจีซี ดำเนินธุรกิจบรรจุภัณฑ์แก้ว โดยเริ่มก่อตั้งโรงงานผลิตบรรจุภัณฑ์แก้วแห่งแรกในปี พ.ศ. 2517 และเริ่มดำเนินการผลิตในปี พ.ศ. 2522 ที่โรงงานปทุมธานีกลาส จ.ปทุมธานี ด้วยกำลังการผลิต 150 ตันต่อวัน ปัจจุบันบีจีซีมีโรงงานผลิตบรรจุภัณฑ์แก้วทั้งหมด 5 แห่ง (ปทุมธานีกลาส อยุธยากลาส ปราจีนบุรีกลาส ขอนแก่นกลาส และราชบุรีกลาส) มีกำลังการผลิตเป็นอันดับหนึ่งของประเทศไทย ด้วยกำลังการผลิตประมาณ 3,495 ตันต่อวัน

โดยทั้ง 5 โรงงานของบีจีซี ใช้วัตถุดิบหลักเดียวกันในการหลอมเป็นแก้วโซดาไลม์ ได้แก่ เศษแก้ว ทราายแก้ว โซดาแอช หินปูน หินฟืนม้า และโดโลไมต์ ปัจจุบันกระบวนการผสมวัตถุดิบก่อนนำเข้าเตาหลอมแก้วจะทำการผสมวัตถุดิบทุกอย่างให้เข้ากันในถังผสมเพียงครั้งเดียว ซึ่งอาจพบปัญหาความไม่สม่ำเสมอในส่วนผสมวัตถุดิบอันเป็นสาเหตุให้วัตถุดิบใช้พลังงานในการหลอมเพิ่มขึ้นหรือหลอมไม่หมดหลงเหลือเป็นตำหนิในเนื้อผลิตภัณฑ์

นอกจากนี้ ในด้านของการใช้พลังงาน ซึ่งเป็นต้นทุนการผลิตประมาณ 30% ของทั้งโรงงานหลอม บีจีซีจึงมีนโยบายเพื่อลดการใช้พลังงานมาอย่างต่อเนื่องผ่านโครงการต่าง ๆ รวมถึงการใช้พลังงานทางเลือกในการหลอมสำหรับโรงงานขอนแก่นกลาส และโรงงานปราจีนบุรีกลาส ทั้งนี้ เป้าหมายในการลดการใช้พลังงานยังต้องคำนึงถึงประสิทธิภาพในการหลอมเป็นหลัก จึงเล็งเห็นถึงการพัฒนาระบบการผสมวัตถุดิบและการใช้วัตถุดิบให้เหมาะสมมากที่สุด ในด้านประสิทธิภาพการใช้พลังงานการหลอม เพื่อตอบสนองต่อนโยบายการลดต้นทุนการผลิต และสิ่งแวดล้อม

จากการดำเนินการของเดือนที่ 1 -12 ได้ทำการทดลองจัดลำดับการผสมโดยการผสมวัตถุดิบทรายแก้วและโซดาแอชก่อน แล้วจึงนำไปผสมกับวัตถุดิบอื่นพบว่าในกระบวนการหลอมแก้วในระดับห้องปฏิบัติการและระดับโรงงานให้ผลเช่นเดียวกันคือพบว่าแก้วที่มีการจัดลำดับการผสมมีแนวโน้มการหลอมเหลวเป็นน้ำแก้วได้เร็วกว่าและใช้พลังงานต่ำกว่าอย่างมีนัยสำคัญ

สำหรับการศึกษาในปีที่ 2 จึงได้ทำการขยายผลเพื่อหาเงื่อนไขที่ทำให้เกิดการหลอมเป็นน้ำแก้วได้เร็วขึ้นและส่งผลให้ลดการใช้พลังงานในการหลอม โดยออกแบบการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการและศึกษากลไกการเกิดปฏิกิริยาของวัตถุดิบเมื่อผ่านการผสมในแต่ละขั้นตอน เพื่ออธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นและนำไปสู่การอธิบายผลที่น่าจะเกิดขึ้นในเตาหลอมแก้วได้

## 1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อพัฒนาความเป็นเนื้อเดียวกันของส่วนผสม
2. เพื่อพัฒนาคุณภาพของส่วนผสมวัตถุดิบแก้ว
3. เพื่อลดการใช้เชื้อเพลิงในการหลอมแก้ว
4. เพื่อศึกษากลไกการเกิดปฏิกิริยาของวัตถุดิบ

## 1.3 ขอบเขตการดำเนินงาน

1. ศึกษาและค้นคว้าเอกสารข้อมูลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. ศึกษาและเก็บข้อมูลกระบวนการผสมวัตถุดิบวิธีปัจจุบัน
3. วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ขนาดอนุภาค และการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของวัตถุดิบ
4. ศึกษาสมบัติความเป็นเนื้อเดียวกันของส่วนผสมที่ผสมด้วยวิธีปัจจุบัน วิเคราะห์และสรุปผล
5. ศึกษาผลการจัดลำดับการผสมและทดสอบการหลอมตัวของวัตถุดิบแก้วด้วยวิธี Batch-Free Time
6. ศึกษาผลการจัดลำดับการผสม ในระดับอุตสาหกรรม

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถนำการจัดลำดับการผสมไปใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานในการหลอมแก้วได้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 กระบวนการในอุตสาหกรรมการผลิตบรรจุภัณฑ์แก้ว

##### 2.1.1 การเตรียมวัตถุดิบในการหลอมแก้ว

วัตถุดิบในกระบวนการหลอมแล้วถูกจัดส่งตามหลักมาตรฐานที่ได้ตกลงร่วมกันระหว่างโรงงานหลอมแก้ว และผู้ขายวัตถุดิบ ทั้งสมบัติทางเคมี และกายภาพ (ขนาดอนุภาค) จึงต้องมีกระบวนการตรวจสอบของการรับวัตถุดิบเพื่อควบคุมคุณภาพ เมื่อผ่านการตรวจสอบแล้ว วัตถุดิบจะถูกจัดเก็บในโกดังหรือไซโล โดยมีการควบคุมสภาพการจัดเก็บอยู่ตลอดเวลา ได้แก่ ความชื้น และสภาพวัตถุดิบที่เตรียมจะผสมใช้

##### 2.1.2 กระบวนการผสมวัตถุดิบ

เมื่อมีการสั่งให้จากผสม วัตถุดิบทั้งหมดจะถูกชั่งตามสูตรน้ำแก้ว โดยคำนึงถึงความชื้นของทราย โซดาแอส และหินฟีนมาในไซโล ณ ช่วงเวลานั้น ๆ และทำการผสมรวมกันในถังผสมตามเวลาที่กำหนด เรียกว่า “ส่วนผสม (Batch)” จากนั้นส่วนผสมจะถูกลำเลียงตามสายพานไปรวมกันกับเศษแก้ว และป้อนเข้าสู่เตาหลอมต่อไป

##### 2.1.3 กระบวนการหลอม

อัตราส่วนผสมที่ป้อนเข้าเตาหลอมจะมีการควบคุมโดยการรักษาระดับของน้ำแก้วในเตา เมื่ออยู่ในเตาหลอม ส่วนผสมจะถูกให้ความร้อนจนหลอมเหลว ณ อุณหภูมิประมาณ 1,500 °C โดยเชื้อเพลิงหลักคือ ก๊าซธรรมชาติ ก๊าซหุงต้ม พลังงานไฟฟ้า หรือพลังงานทางเลือก เช่น น้ำมันไพโรไลซิส น้ำมันเตา นอกจากนี้สำหรับเตาหลอมอุตสาหกรรมบางเตายังมีการใช้พลังงานไฟฟ้าในระบบ Electric booster ร่วมด้วย เพื่อเสริมพลังงานความร้อนให้กับพื้นเตา สำหรับการออกแบบเตาดั้งเดิมมีส่วนที่เรียกว่า Barrier และ Deep zone ช่วยในการหลอมอยู่แล้ว และปัจจุบันเพื่อให้ความจุและการผลิตมากขึ้น บางเตามีการเพิ่ม Bubbler เพื่อช่วยสร้างกระแสแก้วซึ่งไหลวนอยู่ในเตาหลอม จนกว่าวัตถุดิบจะหลอมจนหมด และมีความเป็นเนื้อเดียวกัน จนมีความหนืดที่เหมาะสม จึงจะถูกส่งไปยังห้องแก้วใส (Working end) และแยกไปตามรางน้ำแก้วของแต่ละสายการผลิต ซึ่งจะมีการรักษาอุณหภูมิเพื่อให้เหมาะสมกับการขึ้นรูปของแต่ละผลิตภัณฑ์

ทั้งนี้ ฟองแก๊สจากปฏิกิริยาในการหลอม บางส่วนจะลอยสู่บรรยากาศ บางส่วนยังสะสมอยู่ในน้ำแก้ว จึงต้องมีกระบวนการ Fining ที่ส่วนสุดท้ายของเตาหลอม และ Refining ที่ห้อง

แก้วใส ร่วมกับการใช้สารไล่ฟองในส่วนผสม เพื่อกำจัดฟองในน้ำแก้วและมีความเป็นเนื้อเดียวกันให้ได้มากที่สุด เพื่อไม่ให้เหลือเป็นฟองในเนื้อผลิตภัณฑ์ขวดแก้วหลังขึ้นรูป

#### 2.1.4 กระบวนการขึ้นรูป

น้ำแก้วจากเตาหลอม เมื่อผ่านกระบวนการไล่ฟองแล้วจะถูกส่งไปยังรางน้ำแก้วของแต่ละสายการผลิต ซึ่งมีการควบคุมอุณหภูมิเพื่อให้ก้อนแก้ว (Gob) มีความหนืด (Viscosity) ที่เหมาะสมสำหรับแต่ละรูปแบบของกระบวนการขึ้นรูป และรูปทรงผลิตภัณฑ์ที่แตกต่างกันไป โดยต้องไหลตัวได้ภายใต้แรงกระทำขณะขึ้นรูป และมีความหนืดพอที่จะรักษารูปร่างหลังการขึ้นรูป

#### 2.1.5 กระบวนการอบอ่อน

เมื่อก้อนแก้วผ่านกระบวนการขึ้นรูป จนได้ผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างเป็นบรรจุภัณฑ์ขวดแก้วแล้ว จะลำเลียงตามสายพานเข้าเตาอบอ่อน (Annealing Lehr) โดยรักษาระดับการลดอุณหภูมิของขวดแก้วตั้งแต่ Glass transition temperature ( $T_g$ ) หรือประมาณ  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$  จนถึงอุณหภูมิห้องอย่างช้า ๆ เพื่อคลายความเครียดไม่ให้สะสมในขวดแก้ว จนมีการร้าวหรือแตกของผลิตภัณฑ์

#### 2.1.6 กระบวนการควบคุมคุณภาพและบรรจุ

หลังออกจากเตาอบอ่อนผลิตภัณฑ์แก้วจะถูกพ่นน้ำยาที่ภายนอกของขวดเพื่อป้องกันการเสียดสี จากนั้นลำเลียงด้วยสายพานผ่านระบบการตรวจสอบคุณภาพ ทั้งด้านหน้าจากการหลอมและความไม่สมบูรณ์ของขวดจากการขึ้นรูป เช่น โลหะ เม็ดหิน ฟองอากาศ ความกลมของลำตัว ความสูง เป็นต้น ทั้งจากเครื่องตรวจสอบอัตโนมัติ และโดยสายตามนุษย์ นอกจากนี้ยังมีการสุ่มตัวอย่าง เพื่อทดสอบความแข็งแรงและปริมาตรบรรจุ เมื่อผ่านการตรวจสอบแล้ว ขวดจะถูกลำเลียงไปยังแผนกบรรจุผลิตภัณฑ์ และส่งมอบแก่ลูกค้าต่อไป

## 2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.2.1 วัสดุดิบ

ในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาหน้าที่ของวัสดุดิบสำหรับการหลอมแก้วโซดาไลน์ โดยแบ่งตามหน้าที่ ดังนี้

- 1) วัสดุดิบที่ทำหน้าที่เป็นโครงสร้างหลัก (Network former)

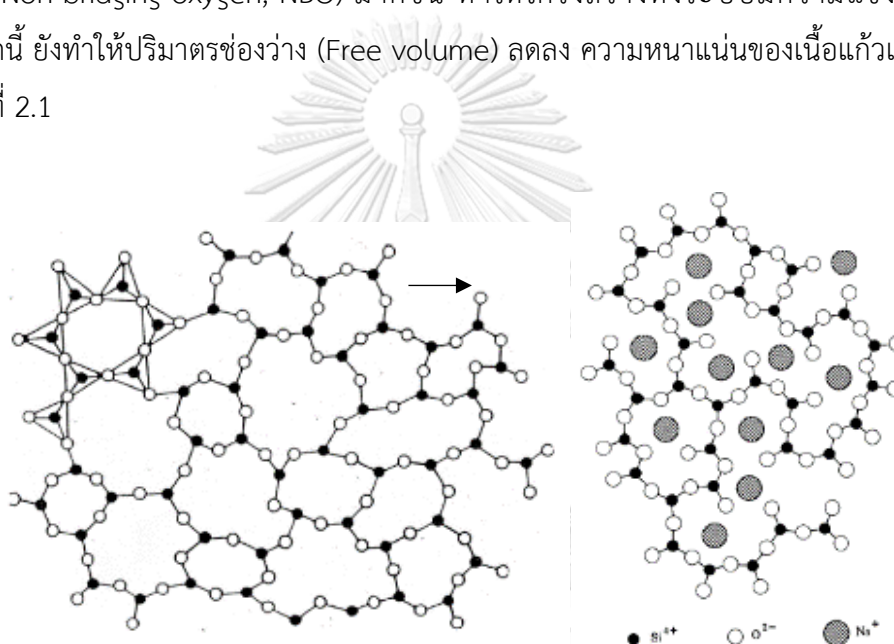
โครงสร้างหลักของเนื้อแก้ว เช่น ททรายแก้ว ( $\text{SiO}_2$ ) แหล่งที่มาในประเทศ เช่น ระยอง สงขลา ร้อยเอ็ด บึงกาฬ ต่างประเทศ เช่น มาเลเซีย เวียดนาม โดยซิลิกาบริสุทธิ์มีจุดหลอมเหลว



ประมาณ 1,700 องศาเซลเซียส เมื่อเย็นตัวลงอย่างรวดเร็วจะมีโครงสร้างแบบไร้ระเบียบ หรืออสัณฐาน (amorphous)

## 2) วัสดุเติมที่ทำหน้าที่เป็นตัวปรับแต่ง (Network modifier)

สารประกอบออกไซด์ของโลหะแอลคาไลน์ ( $R_2O$ ) เช่น โซเดียมไดออกไซด์ ( $Na_2O$ ) จาก โซดาแอช ( $Na_2CO_3$ ) ทำหน้าที่เป็นฟลักซ์ (Fluxing agent) ช่วยลดอุณหภูมิในการหลอมตัว โดยการ ทำลายพันธะเชิงเคมีของซิลิกา ( $SiO_2$ ) และเข้าไปแทรกตัวแทนที่ ส่งผลให้มีจำนวนออกซิเจนไม่มี พันธะ (Non-bridging oxygen, NBO) มากขึ้น ทำให้โครงสร้างทั้งระบบมีความแข็งแรงลดลง นอกจากนี้ ยังทำให้ปริมาตรช่องว่าง (Free volume) ลดลง ความหนาแน่นของเนื้อแก้วเพิ่มมากขึ้น ดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 โครงสร้างอสัณฐานของซิลิกาบริสุทธิ์ และเมื่อมีการเติม  $Na^+$  เพื่อเป็น Fluxing agent  
ที่มา: อภิรัฐ ธีรภาพวิเศษพงษ์, 2019<sup>[1]</sup>

สารประกอบออกไซด์ของโลหะแอลคาไลน์เอิร์ท (RO) ช่วยเสริมโครงสร้างทำให้บรรจุ ภัณฑ์แก้วโซดาโลมแข็งแรง คงทนนอกจากนี้ยังมีสมบัติอื่น ๆ ที่ควรระวัง เช่น แคลเซียมออกไซด์ ( $CaO$ ) จากหินปูน (Limestone,  $CaCO_3$ ) จะทำให้แนวโน้มในการตกผลึก (Devitrification) ของแก้ว เพิ่มขึ้น ดังนั้น จึงมีการแทนที่ด้วยแมกนีเซียมออกไซด์ ( $MgO$ ) จากโดโลไมต์ ( $CaMg(CO_3)_2$ ) ซึ่งจะทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้น ช่วยให้แนวโน้มการตกผลึกของแก้วลดลง โครงสร้างแก้วจะเป็นระเบียบน้อยลง ช่วยยืดระยะเวลาในการคงตัวของแก้ว ในกระบวนการขึ้นรูปได้

### 3) วัตถุดิบที่ทำหน้าที่เป็นอินเทอร์มีเดียต (intermediate)

ได้แก่ อะลูมินา ( $Al_2O_3$ ) ที่ได้จากหินฟีนมา ( $NaAlSi_3O_8$ ) ช่วยเพิ่มความทนทานต่อการกัดกร่อนของสารเคมี และทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลัน ขวดแก้วโซดาไลม์จึงสามารถเป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับของเหลวที่หลากหลายดังปัจจุบัน

### 4) เศษแก้ว (Cullet)

หมายถึง ขวดแก้วที่เคยผ่านกระบวนการหลอมและขึ้นรูปแล้ว นำมาทุบทำลาย ทั้งจากขวดแก้วที่ไม่ผ่านคุณภาพในกระบวนการ นำไปผ่านเครื่องบด และจากการรีไซเคิลขวดแก้วที่ผ่านการบริโภคแล้ว รวบรวมโดยผู้ขายเศษแก้ว การนำเศษแก้วกลับมาใช้ใหม่คิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 40 - 85 ขึ้นกับตลาดขยะแก้ว ทั้งปริมาณและราคาซื้อ ส่วนมากจะช่วยลดต้นทุนในการหลอม ทั้งจากการลดอุณหภูมิหลอมเหลว และปริมาณวัตถุดิบ เนื่องจากแก้วโซดาไลม์ในท้องตลาด มักมีส่วนผสมที่คล้ายกันอยู่แล้ว

### 5) วัตถุดิบสำหรับการไล่ฟองแก๊ส (Refining agent)

โรงงานหลอมบรรจุภัณฑ์แก้วทั่วไป มักใช้สารไล่ฟองเป็นสารที่มีองค์ประกอบเป็นซัลเฟต เช่น โซเดียมซัลเฟต (Sodium sulphate;  $Na_2SO_4$ ) เมื่อมีความร้อนจะเปลี่ยนสภาพเป็นฟองแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ( $SO_2$ ) รวมตัวกับฟองเม็ดเล็ก ๆ อันเป็นผลจากการเกิดปฏิกิริยาในเตาหลอม จนกระทั่งฟองมีขนาดใหญ่เพียงพอสำหรับมีแรงลอยตัวขึ้นเหนือน้ำแก้ว และระเหยไปกับบรรยากาศ ช่วยให้ฟองในเนื้อขวดแก้วลดลง

### 6) วัตถุดิบในการปรับปรุสี (Decolorizer)

การปรับสีมีทั้งเชิงเคมี เกี่ยวกับสภาวะรีดอกซ์ (Redox state) ซึ่งส่งผลต่อ ion state ของเหล็กไอออนที่มีในวัตถุดิบธรรมชาติ โดยปกติ จะมีเฟอร์รัสไอออน ( $Fe^{2+}$ ) อยู่ 80% ให้สีโทนเขียว-น้ำเงิน และอีก 20% ที่เหลือเป็นเฟอร์ริกไอออน ( $Fe^{3+}$ ) ซึ่งให้สีโทนเหลือง ซึ่งเราสามารถปรับสภาวะของน้ำแก้วตามความต้องการของแต่ละผลิตภัณฑ์ได้ เช่น ปรับให้ไปทางออกซิเดชันมากขึ้น เพื่อให้ขวดแก้วมีสีโทนเหลืองมากยิ่งขึ้นนั่นเอง และการปรับสีเชิงกายภาพ ได้แก่การผสมใช้ซีลีเนียม Selenium ( $SeO_2$ ) สำหรับน้ำแก้วสีใส (Flint) ซึ่งให้สีโทนแดง โดยจะช่วยปรับโทนสีของแก้วสีใสซึ่งมักออกเขียวหรือเหลือง ให้เป็นกลาง ดูสว่างมากยิ่งขึ้น

## 7) วัตถุประสงค์ให้สี (Colorizer)

สำหรับผลิตภัณฑ์แก้วสีชา (Amber) เกิดจากสารให้สีในแก้วที่มีไอออนผสม Fe/S colour complex ที่เกิดจากปฏิกิริยาร่วมกันของ Iron oxide ( $\text{Fe}^{3+}$ ) Salt cake ( $\text{S}^{2-}$ ) และ Carbon ( $\text{C}^{4-}$ ) เกิดเป็นโครโมฟอร์ของสีชา (amber chromophore) เพื่อให้ได้ขวดเป็นสีชาตามความต้องการของลูกค้า เพื่อให้บรรจุภัณฑ์แก้วสามารถปกป้องของเหลวจากแสงและรังสีอัลตราไวโอเล็ต

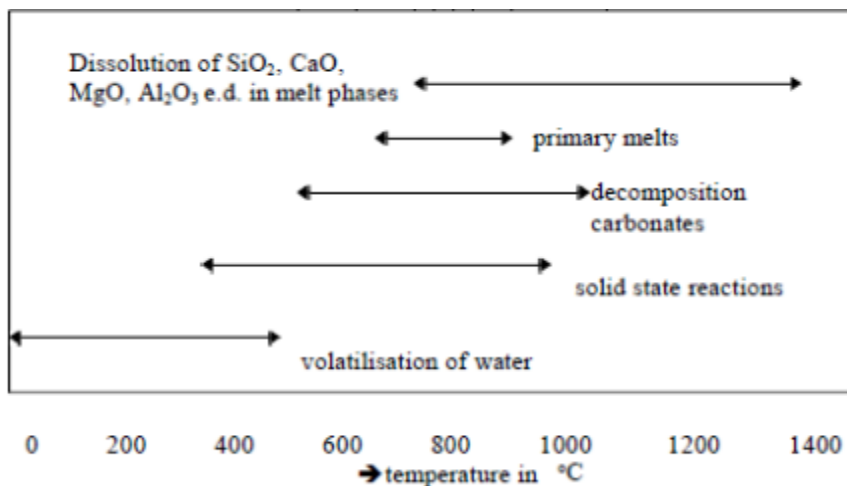
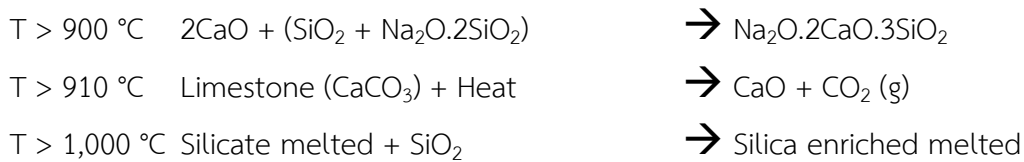
### 2.2.2 ปฏิกิริยาในกระบวนการหลอมแก้ว

กระบวนการหลอมแก้วมีหลายปัจจัยที่สำคัญ ได้แก่ การถ่ายโอนความร้อน (Heat transfer) ซึ่งส่งผลต่ออุณหภูมิ การไหลตัว ความตึงผิว ปฏิกิริยาเคมี และจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยา การออกแบบเตาให้มีการไหลวนของน้ำแก้ว (Flow characteristic) การปล่อยแก๊สจากการเกิดปฏิกิริยาและการเลือกชนิดอิฐทนไฟ รวมถึงอัตราการผลิตที่ส่งผลต่อเวลาที่น้ำแก้วอยู่ในเตา (Residence time)

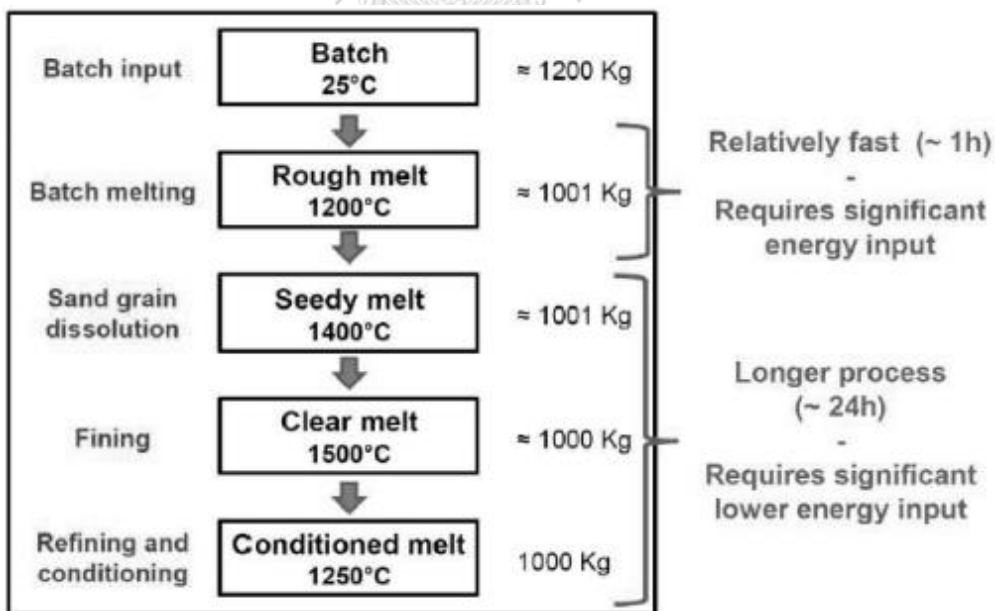
เมื่อส่วนผสมถูกป้อนเข้าเตาหลอมแล้ว ในช่วงแรกจะลอยเป็นแพเหนือน้ำแก้ว หรือเรียกว่า Batch blanket เมื่อเวลาผ่านไป ความร้อนจะถูกส่งผ่านมาที่ Batch blanket จนอุณหภูมิสูงขึ้นเรื่อย ๆ ทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีตามลำดับ ดังภาพที่ 2.2

ในภาพที่ 2.3 แสดงแผนผังโดยสรุปของกระบวนการหลอมแก้ว<sup>[2]</sup> ซึ่งมีขั้นตอนที่ต้องใช้พลังงานสูงอยู่ 2 ช่วง ได้แก่ Batch melting ซึ่งเป็นการทำลายพันธะเชิงเคมีของวัตถุดิบแต่ละตัว และ Sand grain dissolution ซึ่งเป็นการหลอมละลายทรายแก้ว อันเป็นวัตถุดิบหลัก

$T > 100\text{ }^{\circ}\text{C}$	De-hydration	
$T > 540\text{ }^{\circ}\text{C}$	Dolomite ( $\text{MgCO}_3$ ) + Heat	$\rightarrow \text{MgO} + \text{CO}_2\text{ (g)}$
$T > 550\text{ }^{\circ}\text{C}$	Soda ash ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) + Limestone ( $\text{CaCO}_3$ )	$\rightarrow \text{Na}_2\text{Ca}(\text{CO}_3)_2$
$T > 600\text{ }^{\circ}\text{C}$	Limestone ( $2\text{CaCO}_3$ ) + $\text{SiO}_2$	$\rightarrow \text{Ca}_2\text{SiO}_4 + 2\text{CO}_2\text{ (g)}$
$T > 650\text{ }^{\circ}\text{C}$	Dolomite ( $\text{MgCO}_3, \text{CaCO}_3$ ) + Heat	$\rightarrow \text{MgO} + \text{CaO} + \text{CO}_2\text{ (g)}$
$T > 700\text{ }^{\circ}\text{C}$	Soda ash ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) + Sand ( $2\text{SiO}_2$ )	$\rightarrow \text{Na}_2\text{Si}_2\text{O}_5 + \text{CO}_2\text{ (g)}$
$T > 785\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{eut}}$ of Soda ash & Limestone ( $\text{CaCO}_3$ )	
$T > 790\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{eut}}$ of Soda ash & Sand ( $\text{SiO}_2$ )	
$T > 820\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{m}}$ of $\text{Na}_2\text{Ca}(\text{CO}_3)_2$ : melted + $2\text{SiO}_2$	$\rightarrow \text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{CaSiO}_3 + 2\text{CO}_2\text{ (g)}$
$T > 850\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{m}}$ of $\text{Na}_2\text{CO}_3$ : melted + $\text{SiO}_2$	$\rightarrow \text{Na}_2\text{SiO}_3 + \text{CO}_2\text{ (g)}$

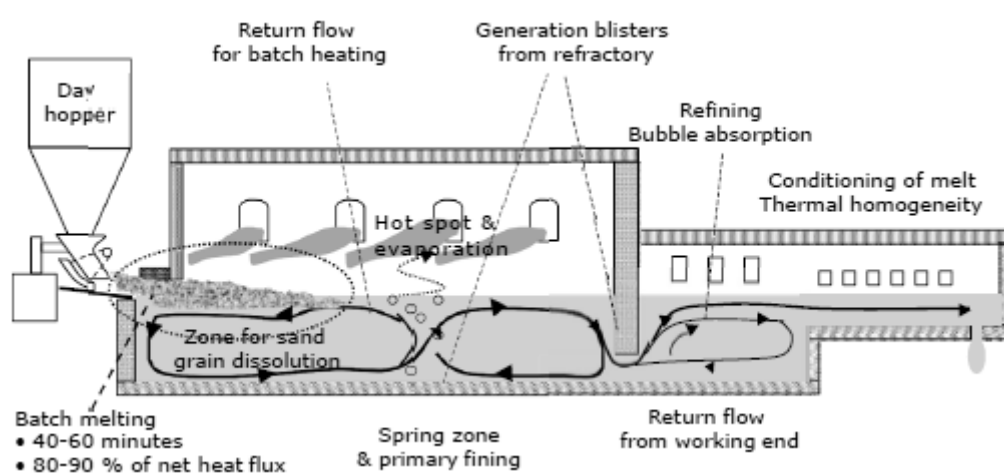


ภาพที่ 2.2 แผนภาพขั้นตอนการหลอม ณ อุณหภูมิต่าง ๆ  
 ที่มา: อภิรัฐ ชีรภาพพิเศษพงษ์, 2019<sup>[1]</sup>



ภาพที่ 2.3 แผนภาพของกระบวนการหลอมแก้ว  
 ที่มา: Reinhard Conrardt, 2013<sup>[2]</sup>

ในภาพที่ 2.4 แสดงภาพตัดขวางของเตาหลอมแก้ว ซึ่งถูกออกแบบให้มีการไหลวนของน้ำแก้ว (Flow characteristic) เป็นอีกปัจจัยที่สำคัญต่ออัตราการละลายของอนุภาคทราย โดยอาศัยหลักกลศาสตร์ของการพาความร้อน (Convection) ผ่านของไหล ในที่นี้คือน้ำแก้วที่หลอมแล้ว การไหลวนของของไหลจะทำให้อนุภาคที่ยังไม่หลอมหรือหลอมไม่หมด รวมถึงของเหลวที่องค์ประกอบเคมีไม่เหมือนกัน หลอมและผสมจนเป็นเนื้อเดียวกันในที่สุด ก่อนที่จะออกจากเตาไปยังห้องแก้วใส (Working end) เพื่อไล่ฟอง (Refining) จนหมด จะได้น้ำแก้วที่เป็นเนื้อเดียวกัน และมีความหนืดที่เหมาะสม จากนั้นจะถูกส่งไปยังรางน้ำแก้วของแต่ละสายการผลิตต่อไป



ภาพที่ 2.4 ภาพตัดขวางของเตาหลอม แสดง Batch blanket และทิศทางกระแสไหลวนของน้ำแก้ว  
ที่มา: อภิรัฐ อธิภาพวิเศษพงษ์, 2019 [1]

### 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การหลอมแก้วโดยเฉพาะการหลอมองค์ประกอบจำพวกซิลิเกตมักใช้พลังงานสูง จึงมีการเพิ่มฟลักซ์ เพื่อเป็นตัวลดอุณหภูมิในการหลอมละลายของทั้งระบบ เช่น โซเดียมคาร์บอเนตและแคลเซียมคาร์บอเนต ฟลักซ์ออกไซด์เหล่านี้จะทำลายการเชื่อมต่อของพันธะเคมีระหว่างซิลิกอนและออกซิเจน เช่น การแทนที่ของไอออนโซเดียมในโครงสร้าง ดังภาพที่ 2.1

การศึกษาเพื่อพัฒนากระบวนการหลอมแก้ว มีในหลากหลายมิติ เช่น การปรับความเหมาะสมขององค์ประกอบเคมี การออกแบบเตาหลอม การปฏิบัติงาน กระบวนการหลอมแก้วโดยภาพรวม<sup>[3-6]</sup> ปฏิกริยาในการหลอม และพฤติกรรมในช่วงแรกเริ่มที่ส่วนผสมเข้าเตา<sup>[7, 8]</sup> การเกิดโฟมในเตาหลอม<sup>[9-12]</sup> การหลอมเหลวของวัตถุดิบ<sup>[13-15]</sup>

นอกจากนี้ มีการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และสมการที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทความร้อนระหว่างกระบวนการหลอม พฤติกรรมการไหลวนของน้ำแก้วในเตาหลอม<sup>[16-19]</sup> การถ่ายเทความร้อน

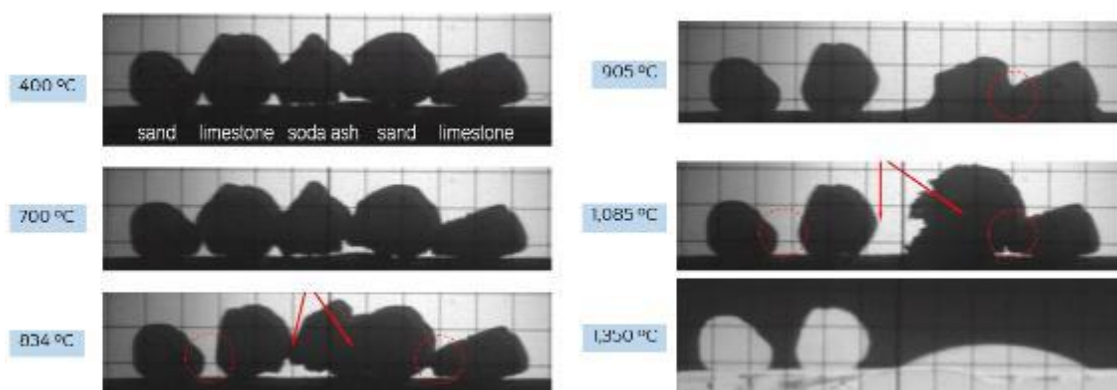
ร้อนของแต่ละกระบวนการย่อย เช่น ส่วนผสมเมื่อเข้าเตา<sup>[20-22]</sup> การหลอมละลายของทรายแก้ว<sup>[23-25]</sup> แบบจำลองของปฏิกิริยาระหว่างทรายแก้วและโซเดียมคาร์บอเนต<sup>[3]</sup>

จุดยูเทกติกของโซเดียมและแคลเซียมคาร์บอเนตอยู่ที่อุณหภูมิ 775 องศาเซลเซียส ในขณะที่ส่วนผสมระหว่างโซเดียมไดซิลิเกตกับซิลิกาจะหลอมที่ประมาณ 800 องศาเซลเซียส เฟสที่อยู่เหนือจุดยูเทกติกเป็นของเหลว ในขณะที่มีกระบวนการสลายสารประกอบคาร์บอเนตและแก๊สอื่นๆ ทำให้เกิดกระแสการกวนของน้ำแก้ว ส่งผลให้มีการหลอมละลายทรายซิลิกามากขึ้น การเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของซิลิกาในการหลอมทำให้อุณหภูมิในการหลอมเพิ่มขึ้นจะช่วยรักษาให้น้ำแก้วยังเป็นของไหล และทำให้วัตถุดิบทั้งหมดหลอมละลาย<sup>[14]</sup> ขั้นตอนดังกล่าวในกระบวนการหลอมนี้ต้องการพลังงานสูงมาก

กระบวนการหลอมแก้วที่ส่งผลเป็นอย่างมากต่อความต้องการพลังงานคือการเปลี่ยนจากวัตถุดิบเป็นแก้วหลอม<sup>[3, 4, 14]</sup> ดังนั้น หนึ่งในวิธีแก้ปัญหาด้านพลังงานคือการเร่งกระบวนการหลอมของส่วนผสมเพื่อลดเวลาและการใช้พลังงาน ในมุมมองด้านอุตสาหกรรม จะสามารถนำแนวคิดไปใช้ลดต้นทุนพลังงาน โดยการเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาสถานะของแข็งที่เปลี่ยนทรายซึ่งเป็นวัตถุดิบหลักให้เป็นสารประกอบซิลิเกตที่หลอมเหลวได้ง่ายกว่า ปฏิกิริยาทางเคมีเป็นขั้นตอนที่กำหนดอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นที่ขอบเกรนของผลึก จากนั้นอัตราการเกิดจะขึ้นกับการแพร่ของสารประกอบอัลคาไลน์จากพื้นผิวของทรายแพร่ผ่านแต่ละระดับชั้นพลังงาน<sup>[6]</sup>

เพื่อศึกษาปฏิกิริยาระหว่างทรายและโซเดียมคาร์บอเนต ดังภาพที่ 2.5 ทดลองให้ความร้อนที่ 750 องศาเซลเซียส พบว่าเกรนของโซเดียมคาร์บอเนตถูกล้อมรอบด้วยเกรนของทราย แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาเริ่มต้นเกิดขึ้นที่ผิวสัมผัส ระหว่างทรายและโซเดียมคาร์บอเนต จึงกล่าวได้ว่าการอยู่ติดกันของทรายและโซเดียมคาร์บอเนตจะเป็นกุญแจสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงจากวัตถุดิบไปเป็นน้ำแก้ว<sup>[26]</sup> ที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมเหลว ส่วนผสมที่ขึ้นรูปเป็นก้อนมีการถ่ายเทความร้อนระหว่างทรายและโซเดียมคาร์บอเนตดีกว่าการผสมแบบดั้งเดิม ดังนั้น ลำดับการเกิดปฏิกิริยาจึงเป็นสิ่งที่ควรให้ความสนใจ<sup>[27]</sup>

ปี ค.ศ. 2013 R. Conradt<sup>[2]</sup> ณ งานประชุมวิชาการ International Commission on Glass (ICG) ณ กรุงปราก สาธารณรัฐเช็ก นำเสนอเกี่ยวกับการปรับส่วนผสมที่มีสัญญาณและกลไกการเกิดปฏิกิริยาต่างกัน โดยที่สูตรน้ำแก้ว องค์ประกอบเคมียังคงเดิม เพราะฉะนั้น ค่าพลังงานความร้อนที่ใช้ในการหลอมวัตถุดิบ ( $H_{ex}$ ) ซึ่งได้จากการคำนวณทางเทอร์โมไดนามิกส์จะคงที่ ดังนั้น แนวคิดด้านการประหยัดพลังงานจึงอยู่ในแง่ของการลดเวลาในการหลอม โดยอาศัยการปรับเปลี่ยนกลไกการเกิดปฏิกิริยาที่เปลี่ยนแปลงไปตามการใช้วัตถุดิบและการผสม



ภาพที่ 2.5 การศึกษาการเกิดปฏิกิริยาระหว่างอนุภาคทราย โซดาแอส และหินปูน  
ณ อุณหภูมิต่าง ๆ

เทคนิคในการวิเคราะห์พฤติกรรมเชิงความร้อนของวัสดุมีหลากหลายวิธี ได้แก่ การวิเคราะห์เชิงความร้อนเชิงผลต่าง (differential scanning calorimetry, DSC/ Differential thermal analysis, DTA) และการวิเคราะห์เทอร์โมกราวิเมตริก (Thermogravimetric analysis, TGA) เพื่ออธิบายประเด็นความไวของปฏิกิริยาและเสถียรภาพของวัสดุ มีการประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์เชิงจลนพลศาสตร์ การประเมินพลังงานกระตุ้น (activation energy,  $E_a$ ) ของขั้นตอนที่เปลี่ยนแปลงไปจากการได้รับความร้อนนิยมใช้วิธีของคิสซิงเกอร์<sup>[28, 29]</sup> (the Kissinger method) และวิธีของโอซาวา<sup>[30, 31]</sup> (the Ozawa method) ถึงแม้จะเป็นที่ทราบกันดีว่าอาจให้ข้อมูลเชิงลึกไม่พอที่จะใช้อธิบายทั้งกระบวนการ อันเนื่องมาจากความซับซ้อนของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น ดังนั้น ผลของค่าพลังงานกระตุ้นจึงมีผลมาจากพื้นฐานของข้อสันนิษฐานที่ตั้งไว้

### บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย

- 3.1 วัสดุดิบและสารเคมีที่ใช้การทดลอง
- |                                              |                                 |                |
|----------------------------------------------|---------------------------------|----------------|
| 1. ททรายแก้ว ( $\text{SiO}_2$ )              | ขนาด 0.10 – 0.63 มิลลิเมตร      | แหล่งระยอง     |
| 2. โซดาแอช ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ )      | โซเดียมคาร์บอเนตไม่น้อยกว่า 99% | แหล่งตุรกี     |
| 3. หินปูน ( $\text{CaCO}_3$ )                | ขนาด 0.10 – 2.00 มิลลิเมตร      | แหล่งสระบุรี   |
| 4. โดโลไมต์ ( $\text{CaMg}(\text{CO}_2)_3$ ) | ขนาด 0.10 – 2.00 มิลลิเมตร      | แหล่งกาญจนบุรี |
| 5. หินฟันม้า ( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ ) | อลูมินาอยู่ในช่วงร้อยละ 17–18   | แหล่งราชบุรี   |
- 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง
1. เตาทอบ
  2. ตะแกรงร่อน ขนาดช่อง 2.00, 1.60, 1.00, 0.80, 0.63, 0.315, 0.25, 0.10 มิลลิเมตร
  3. ถาดอะลูมิเนียม
  4. ซ้อนตักสาร
  5. ปีกเกอร์
  6. ขวดรูปชมพู
  7. เครื่องชั่งความละเอียดทศนิยม 2 ตำแหน่ง
  8. เครื่องชั่งความละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง
  9. เครื่องผสมขนาดทดลอง
  10. เตาทลอม 1,700 องศาเซลเซียส
  11. เตาทลอม 1,100 องศาเซลเซียส
  12. เครื่องตัดขวด
  13. กล้องจุลทรรศน์โพลาไรซ์
  14. เครื่องบดวัตถุดิบ
  15. เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

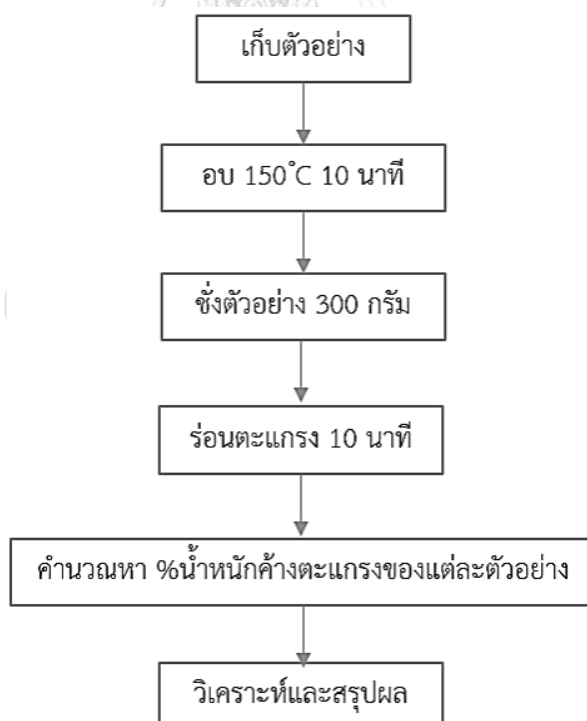


### 3.3 ขั้นตอนการทดลอง

จากวัตถุประสงค์ที่ต้องการปรับลำดับการผสมในระดับอุตสาหกรรม โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อลดการใช้พลังงานในการหลอม เพื่อส่งมอบความเชื่อมั่นว่าการปรับวิธีผสมจะไม่ส่งกระทบด้านลบต่อกระบวนการอื่นไปจนถึงคุณภาพของน้ำแก้วและขวด จึงต้องทำการทดสอบความเป็นเนื้อเดียวกันของส่วนผสมทั้งก่อนและหลังการปรับวิธีผสม และมีการทดสอบหลอมระดับห้องปฏิบัติการ ก่อนนำเสนอเพื่อทดสอบหลอมระดับอุตสาหกรรม

#### 3.4.1 ทดสอบความเป็นเนื้อเดียวกันของกระบวนการผสมปัจจุบัน

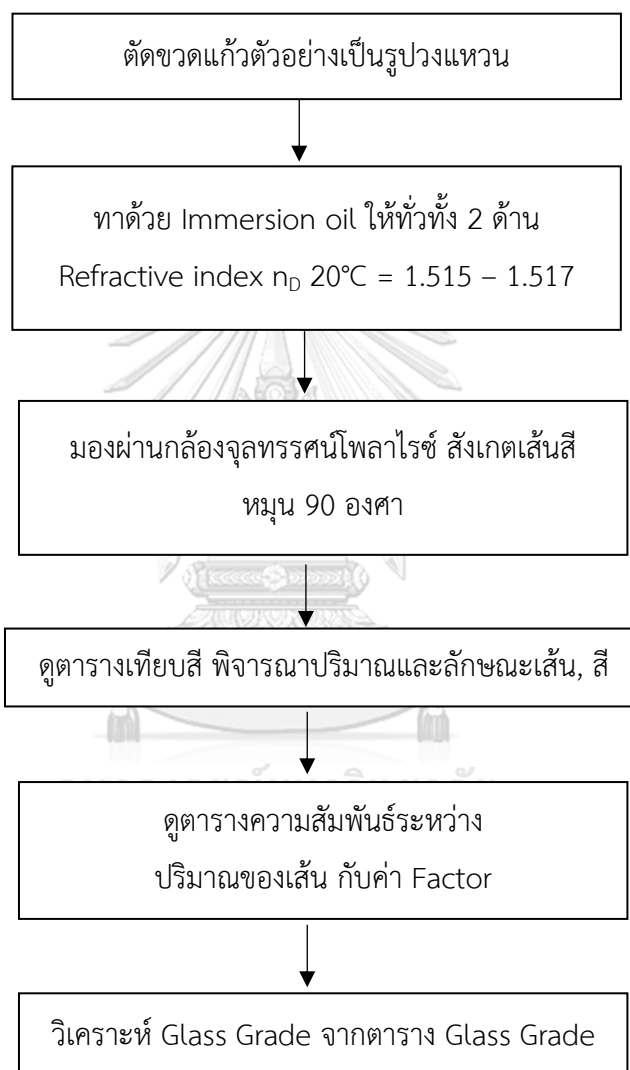
เพื่อทดสอบความเป็นเนื้อเดียวกันของส่วนผสมปัจจุบัน และกำหนดมาตรฐานสำหรับการวัดผลส่วนผสมในการทดลองจัดลำดับการผสม และการทดลองอื่น ๆ ต่อไป เป็นข้อมูลยืนยันว่าส่วนผสมยังคงมีคุณภาพเหมือนเดิมแม้จะมีลำดับการผสมที่เปลี่ยนไป ดังภาพที่ 3.1 เก็บตัวอย่างจากการผสม 1 ครั้งหลังการผสมทุก ๆ 30 วินาที จนส่วนผสมถูกถ่ายออกจากถังผสมจนหมด โดยเก็บตัวอย่างจากการผสมจำนวน 2 ครั้ง เพื่อการทดสอบซ้ำ และเก็บตัวอย่างอีก 1 มิติ เป็นการผสมตลอดทั้งวัน เก็บตัวอย่างหลังการผสมทุกครั้ง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง



ภาพที่ 3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการทดสอบความเป็นเนื้อเดียวกันของส่วนผสม

### 3.4.2 การวิเคราะห์ Glass grade

เพื่อวิเคราะห์ความเป็นเนื้อเดียวกันของผลิตภัณฑ์แก้ว ใช้ประกอบการกำหนดมาตรฐานการวัดความเป็นเนื้อเดียวกันของกระบวนการผสม โดยใช้หลักการหักเหที่ไม่เท่ากันของเนื้อแก้ว จากการจัดเรียงตัว หรือองค์ประกอบ โดยมีวิธีดังภาพที่ 3.2 และตารางการเทียบผล ตารางที่ 3.1, 3.2 และ 3.3



ภาพที่ 3.2 แผนผังแสดงขั้นตอนการทดสอบความเป็นเนื้อเดียวกันของเนื้อแก้ว

ตารางที่ 3.1 ระบุ factor จากจำนวนเส้นที่พบในชั้นงานตัวอย่าง

ปริมาณของเส้น	Factor
0 – 10 %	1
10 – 20 %	2
20 – 30 %	3
30 – 40 %	4
40 % ขึ้นไป	5

ตารางที่ 3.2 ระบุ Equivalent Retardation จากสีที่พบในชั้นงานตัวอย่าง

Blue Position	Orange Position	Equivalent Retardation (nm.)
Violet - red	Violet - red	0
Violet - blue	Red	20
Dark blue	Red - orange	35
Blue	Orange	75
Blue - green	Orange - yellow	120
Deep - green	Gold - yellow	150
Green	Yellow	180
Pale green	Pale yellow	220
Yellowish green	Yellow - white	255
Greenish yellow	White	290
Pale yellow	Gray - white	330

ตารางที่ 3.3 ระบุ Glass grade จาก Factor และ Equivalent Retardation

Glass grade	Factor					Equivalent Retardation
	1	2	3	4	5	
A	0 – 9					
A <sup>-</sup>	9.1 – 27	0 – 9				
B <sup>+</sup>	27.1 – 55	9.1 – 27	0 – 18			
B	55.1 – 82	27.1 – 55	18.1 – 36	0 – 18	0 – 9	
B <sup>-</sup>	82.1 – 109	55.1 – 82	36.1 – 55	18.1 – 36	9.1 – 27	
C <sup>+</sup>	109.1 – 136	82.1 – 109	55.1 – 82	36.1 – 55	27.1 – 45	
C	136.1 – 173	109.1 – 136	82.1 – 109	55.1 – 82	45.1 – 64	
C <sup>-</sup>	173.1 – 218	136.1 – 173	109.1 – 136	82.1 – 109	64.1 – 91	
D <sup>+</sup>	218.1 – 264	173.1 – 218	136.1 – 173	109.1 – 136	91.1 – 118	
D	264.1 – 318	218.1 – 264	173.1 – 218	136.1 – 173	118.1 – 145	
D <sup>-</sup>	318.1 – 382	264.1 – 318	218.1 – 264	173.1 – 218	145.1 – 182	
E <sup>+</sup>	382.1 – 455	318.1 – 382	264.1 – 318	218.1 – 264	182.1 – 236	
E	455.1 – 536	382.1 – 455	318.1 – 382	264.1 – 318	236.1 – 300	
E <sup>-</sup>	536.1 – 655	455.1 – 655	382.1 – 655	318.1 – 382	300.1 – 655	



### 3.4.3 การเตรียมวัตถุดิบและการหลอมแก้ว ระดับห้องปฏิบัติการ

วิเคราะห์ชนิดของธาตุและปริมาณธาตุซึ่งเป็นองค์ประกอบในสารตัวอย่าง แสดงผลเป็นสัดส่วนขององค์ประกอบออกไซด์ของแต่ละธาตุ โดยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโทรเมตรี (XRF : X-ray Fluorescence Spectroscopy) แสดงดังตารางที่ 3.1 เพื่อนำผลไปคำนวณสัดส่วนการผสมตามเป้าหมายขององค์ประกอบออกไซด์ของน้ำแก้วที่ต้องการ

ตารางที่ 3.4 องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบแต่ละชนิด

วัตถุดิบ	องค์ประกอบเชิงเคมี (หน่วย : ร้อยละ)						
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O
ทราย	98.99	0.41	0.06	0.01	0.00	0.04	0.20
หินฟันม้า	68.34	18.38	0.29	2.85	0.18	8.13	0.59
โดโลไมต์	0.13	0.08	0.03	32.06	20.63	0.00	0.00
หินปูน	1.26	0.20	0.10	53.39	0.69	0.00	0.02
โซดาแอช	0.02	0.00	0.00	0.01	0.00	58.27	-

อบวัตถุดิบที่ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นชั่งน้ำหนักตามสัดส่วนที่กำหนด สำหรับการผสมแบบจัดลำดับจะเริ่มที่ผสมน้ำ เพื่อเพิ่มความชื้นให้ทรายสัดส่วนร้อยละ 6 จากนั้นเติมโซดาแอชและผสมเป็นเวลา 5 นาที จากนั้นจึงเติมวัตถุดิบที่เหลือลงไปและผสมต่อเป็นเวลา 5 นาที ในขณะที่ส่วนผสมโดยการผสมแบบดั้งเดิม วัตถุดิบทั้ง 5 อย่างจะถูกเทรวมกัน จากนั้นใช้เครื่องผสมแบบหมุน (overhead shaker) ความเร็วรอบ 30 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที ก่อนเติมน้ำ เพื่อเพิ่มความชื้นที่สัดส่วนร้อยละ 6 เช่นเดียวกัน จากนั้นเทลงเข้าหลอม นำเข้าเตาหลอม ณ ภาวะต่าง ๆ ที่กำหนด ทั้งอุณหภูมิ และเวลาในการหลอม

เปรียบเทียบความสามารถในการหลอมตัวของส่วนผสมโดยใช้ภาพถ่ายมุมบนของผิวหน้าในเข้าหลอม จากนั้นนำไปคำนวณพื้นที่ของสัดส่วนผลึกหลงเหลือกับส่วนที่เป็นเนื้อแก้วหลอมด้วยฟังก์ชัน Measurement Log โปรแกรมโฟโตชิอป

ตัวอย่างส่วนผสมในการทดสอบหลอม ได้แก่ ส่วนผสมจากการผสมแบบดั้งเดิม และแบบจัดลำดับการผสม

### 3.4.3 วิเคราะห์สมบัติทางเฟสของผลึกที่คงเหลืออยู่ โดยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD: X-ray Fluorescence Diffraction)

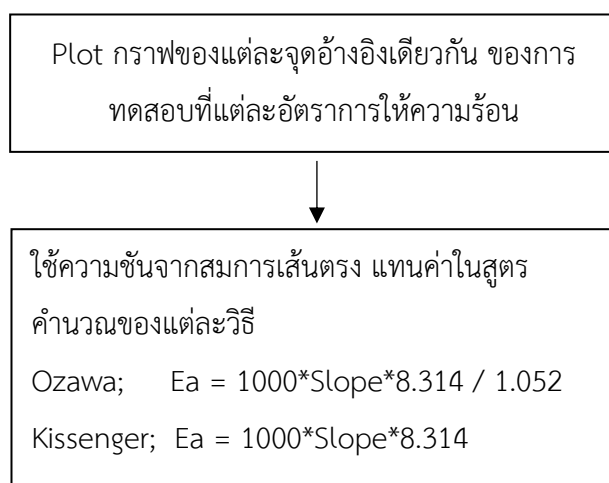
คัดเลือกแก้วบริเวณผิวหน้า บดให้ละเอียด ขนาดเล็กกว่า 100 เมช นำไปวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสของชิ้นงานจากส่วนผสมของทั้งสองวิธี เพื่อศึกษาเฟส ณ แต่ละอุณหภูมิการหลอม ในการยืนยันพฤติกรรมของน้ำแก้วที่ไม่เปลี่ยนแปลงจนส่งผลเสียต่อคุณภาพขวด

เมื่อได้กราฟของผลการวิเคราะห์แล้ว นำไปคำนวณสัดส่วนระหว่างผลึกและอสัณฐาน ด้วยวิธี Rietveld refinement โดยให้พื้นที่ได้กราฟเป็นเส้น Based ถือเป็นอสัณฐาน และพีคที่เห็นชัดเจนนำมาคำนวณเป็นสัดส่วนของผลึกหลงเหลือ

### 3.4.4 วิเคราะห์สมบัติการเปลี่ยนแปลงทางความร้อน โดยเทคนิคการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อน

เพื่อศึกษาปฏิกิริยาระหว่างวัตถุดิบ 2 ชนิด เตรียมวัตถุดิบสัดส่วน 1 ต่อ 1 ปริมาณ 20 กรัม ผสมให้เข้ากัน จากนั้นจึงตักตัวอย่างปริมาณ 0.020 กรัม ทดสอบที่ช่วงอุณหภูมิ 30 - 1450 องศาเซลเซียส อัตราเพิ่มอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที ใช้บรรยากาศเป็นอากาศเพื่อให้สภาวะใกล้เคียงกับเตาหลอมจริง

เพื่อศึกษาปฏิกิริยาของส่วนผสมวัตถุดิบหลัก 5 ชนิด เปรียบเทียบระหว่างการผสมสองวิธี เตรียมตัวอย่างโดยการชั่งตามสัดส่วนเดียวกับการทดลองหลอมแก้วปริมาณรวม 20 กรัม ผสมให้เข้ากัน จากนั้นตักตัวอย่างปริมาณ 0.020 กรัม ควบคุมความชื้นโดยเติมน้ำประมาณ 5 กรัม ส่วนผสมแบบจัดลำดับเติมน้ำในทราย ส่วนการผสมแบบตั้งเดิมเติมน้ำเป็นขั้นตอนสุดท้าย ทดสอบที่ช่วงอุณหภูมิ 30 - 1500 องศาเซลเซียส อัตราเพิ่มอุณหภูมิ 5, 10 และ 15 องศาเซลเซียสต่อนาที ใช้บรรยากาศเป็นอากาศ นำข้อมูลใช้คำนวณหาพลังงานกระตุ้น<sup>[28, 30]</sup> ด้วยวิธีดังภาพที่ 3.3

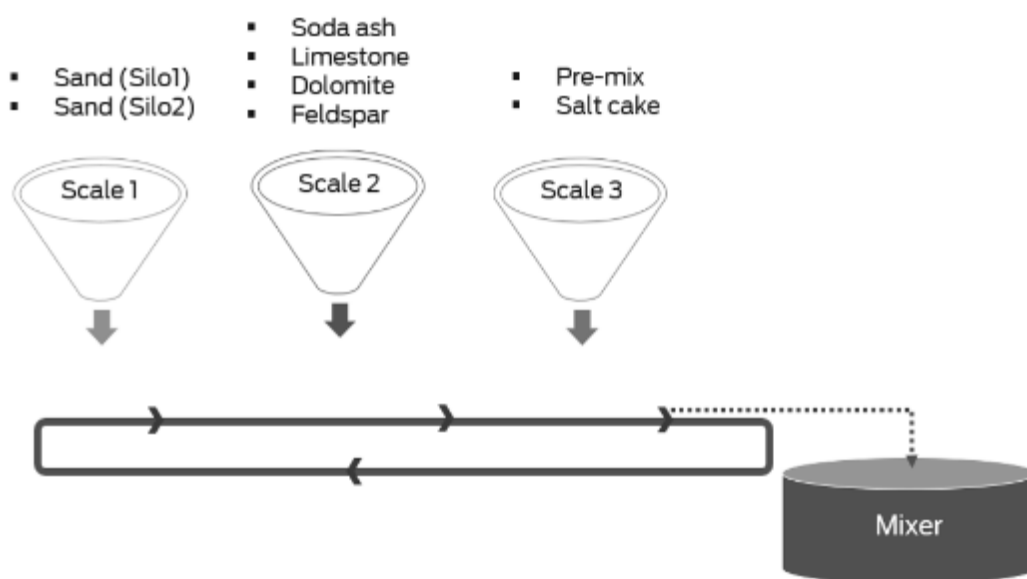


ภาพที่ 3.3 การคำนวณหาพลังงานกระตุ้น

### 3.4.5 ทดลองหลอมแบบจัดลำดับการผสม ระดับอุตสาหกรรม

จากภาพที่ 3.2 แสดงแผนภาพการผสมวัตถุดิบ ซึ่งประกอบด้วยเครื่องชั่ง (scale) จำนวน 3 เครื่อง สายพานเคลื่อนย้ายวัตถุดิบเข้าถังผสม (discharge belt) และถังผสม (mixer)

การจัดลำดับการผสมในระดับอุตสาหกรรม แบ่งเป็น 2 ขั้นตอน คือ ผสมทรายกับโซดาแอชก่อนเป็นลำดับแรก จากนั้นจึงเติมวัตถุดิบอื่น ๆ ตามไปกวนผสม สำหรับเตาหลอมที่มีโปรแกรมผสมอยู่แล้ว เช่น เตาหลอม A และ B สามารถปรับคำสั่งการป้อนผสมได้เลย



ภาพที่ 3.4 แผนภาพการผสมวัตถุดิบของเตาหลอม A

จากตารางที่ 3.2 เวลาทั้งหมดที่ใช้ในการผสมจะเพิ่มขึ้น เมื่อผสมแบบจัดลำดับ จากกระบวนการที่เพิ่มขึ้น ได้แก่ รอกการชั่ง (Weigh) รอกการปล่อย (Discharge) และมีการผสมแบบแห้งขั้นตอนที่ 2 (Dry mix step 2) ซึ่งช่วงเวลาดังกล่าวจะมากขึ้นอยู่กับลักษณะหรือเงื่อนไขของแต่ละเตาหลอม

สำหรับเตา A และ B ซึ่งมีโปรแกรมจัดลำดับการผสมอยู่แล้ว เวลาจะถูกกำหนดจากการชั่งของขั้นตอนที่ 2 คือ วัตถุดิบที่เหลือ เนื่องจากใช้เครื่องชั่งเดียวกับโซดาแอช จึงต้องรอให้โซดาแอชถูกปล่อยสู่ถังผสมก่อน ส่วนเตา C, D สามารถชั่งพร้อมกันได้เลย และเนื่องจากยังไม่มีโปรแกรม จึงเป็นการตั้งเวลาปล่อย ให้ทรายกับโซดาแอชปล่อยลงสู่ถังผสม ก่อน E ก็เช่นเดียวกัน แต่โซดาแอชชั่งรวมกับแร่หินฟืนม้า การผสมขั้นต้นจึงมีทั้งทราย โซดาแอช และแร่หินฟืนม้าต่างจากอีก 4 เตา

ตารางที่ 3.5 เปรียบเทียบเวลาของแต่ละขั้นตอนการผสม ของวิธีผสมแบบดั้งเดิมและแบบจัดลำดับ

กระบวนการ ผสมวัตถุดิบ	A, B (โปรแกรม)		C, D		E	
	ดั้งเดิม	จัดลำดับ	ดั้งเดิม	จัดลำดับ	ดั้งเดิม	จัดลำดับ
ชั่งน้ำหนัก	280	210	180	180	160	160
ปล่อยขั้นตอน 1	60	60	60	60	62	62
ผสมแห้งขั้นตอน 1	90	180	90	120	120	180
ปล่อยขั้นตอน 2	-	30	-	20	-	25
ผสมแห้งขั้นตอน 2	-	60	-	90	-	90
เติมน้ำ	0	0	0	0	13	13
ผสมเปียก	120	90	120	120	120	90
ปล่อยส่วนผสม	60	60	55	55	55	55
เวลาผสมรวม (วินาที)	330	480	325	465	370	515



## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

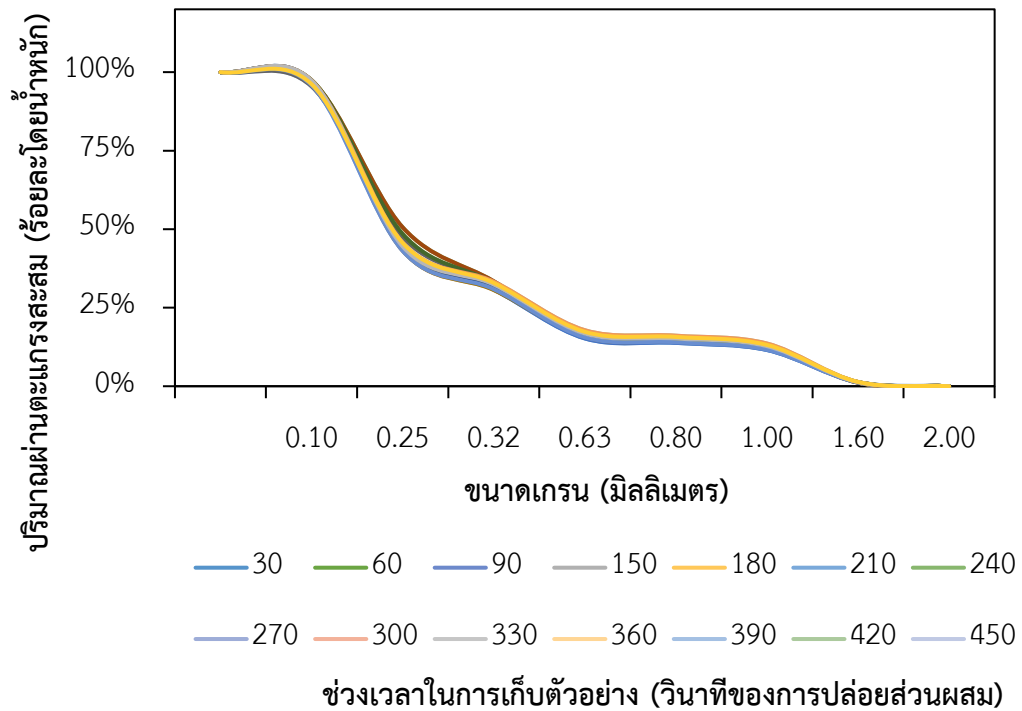
#### 4.1 การทดสอบความเป็นเนื้อเดียวกันของกระบวนการผสมปัจจุบัน

จากภาพที่ 4.1 ทดสอบการกระจายตัวของขนาดอนุภาคการผสม 1 ครั้ง ผลการทดสอบจากการเก็บตัวอย่าง 15 ตัวอย่าง เว้นช่วงเวลาที่ปล่อยส่วนผสมลงสายพานตัวอย่างละ 30 วินาทีเท่า ๆ กัน พบว่า ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณผสมกับขนาดอนุภาคที่เล็กกว่า ที่คัดขนาดด้วยการหาส่วนผสมที่ค้ำตะแกรงขนาดต่าง ๆ มีค่าต่ำกว่า 5<sup>[13]</sup> ประกอบกับผลวิเคราะห์การกระจายตัวของขนาดอนุภาค ที่ใกล้เคียงกัน สามารถสรุปได้ว่าการเก็บตัวอย่างของแต่ละช่วงเวลาไม่ส่งผลต่อผลการวัดความเป็นเนื้อเดียวกันของส่วนผสมอย่างมีนัยสำคัญ และทุกจุดของส่วนผสมในถังผสม 1 ครั้ง มีความเป็นเนื้อเดียวกัน

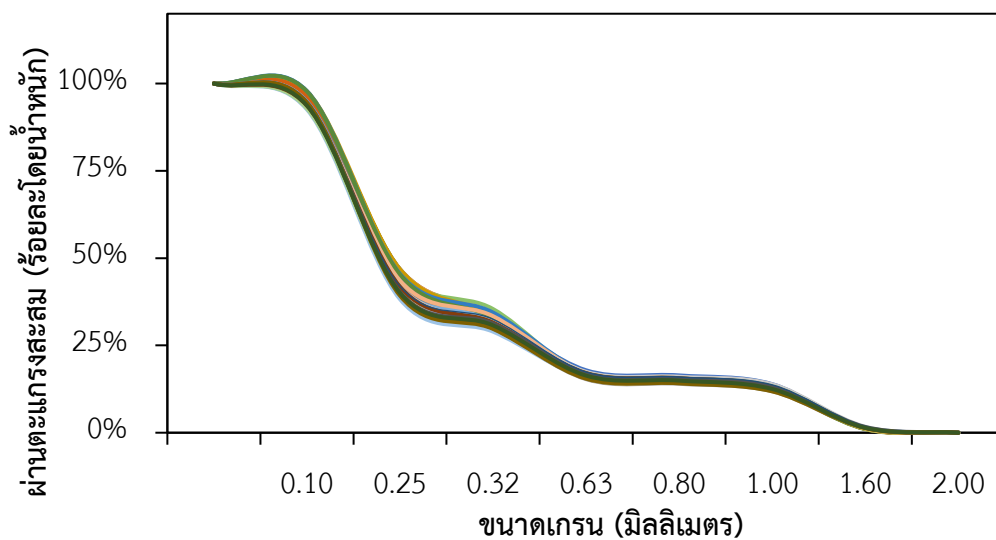
จากภาพที่ 4.2 ทดสอบการกระจายตัวของขนาดอนุภาคการผสม 1 วันเต็ม หรือการผสมจำนวน 36 ครั้ง ครั้งละ 1 ตัวอย่าง โดยที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงปัจจัยอื่น ๆ ณ วันที่เก็บตัวอย่าง เช่น สัดส่วนของแต่ละวัตถุดิบ เวลาผสม ความชื้นของส่วนผสม เป็นต้น

จากการทดสอบ พบว่าในแต่ละครั้งของการผสม มีแนวโน้มการกระจายตัวของอนุภาคเป็นไปในทางเดียวกัน โดยพบความแตกต่างเพียงเล็กน้อย ในช่วงอนุภาคค้ำตะแกรงขนาด 0.250 และ 0.315 มิลลิเมตร สรุปได้ว่าการผสมด้วยวิธีปัจจุบันนั้นมีความเป็นเนื้อเดียวกันที่ดีอยู่แล้ว จากผลการวัดความเป็นเนื้อเดียวกันของส่วนผสมจากการกระจายตัวของอนุภาค ประกอบกับการสุ่มวัดความเป็นเนื้อเดียวกันของเนื้อแก้วจากขวดแก้วโดยกระบวนการควบคุมคุณภาพ รวมถึงเมื่อเข้าไปในเตา จะมีการไหลวนของน้ำแก้ว ที่ไม่เพียงแต่จะช่วยให้ทรายแก้วละลายจนหมด แต่ยังเป็นการกวนให้น้ำแก้วในเตามีความเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้นอีกด้วย

การปฏิบัติงานจริง หน่วยงานวิเคราะห์วัตถุดิบและแก้ว ทำการเก็บตัวอย่างขวดแก้วหลังกระบวนการอบอ่อน ทำการตัดขวดเป็นวงแหวน จากนั้นตรวจสอบผ่านกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงโพลาไรซ์ เพื่อวิเคราะห์ความเป็นเนื้อเดียวกันของเนื้อแก้ว และแปรผลแบ่งเป็นระดับ (Glass grade) แจ้งหน่วยงานที่เกี่ยวข้องทราบ เพื่อนำผลการวิเคราะห์ไปใช้ในการควบคุมคุณภาพน้ำแก้วให้เป็นไปตามค่ามาตรฐาน โดย Glass grade ที่ยอมรับ ได้แก่ C- ขึ้นไป จากตารางที่ 4.1 แสดงระดับ Glass grade ของขวดตัวอย่างทุกวันจาก 4 เตาลอม จะเห็นว่าไม่ต่ำกว่าเกรด B นั่นคือ ขวดแก้วมีความเป็นเนื้อเดียวกันตามมาตรฐานอยู่แล้ว



ภาพที่ 4.1 ผลวิเคราะห์การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของการผสม 1 ครั้ง  
แต่ละเส้นแทนตัวอย่างของการเก็บตัวอย่าง ณ แต่ละวินาทีของการปล่อยส่วนผสม (ห่าง 30 วินาที)



ภาพที่ 4.2 ผลวิเคราะห์การกระจายตัวของอนุภาคของการผสม 1 วัน  
แต่ละเส้นแทนตัวอย่างของการผสม 1 ครั้ง รวมทั้งหมด 36 ครั้ง

ตารางที่ 4.1 ตัวอย่างการแจ้งระดับความเป็นเนื้อเดียวกันเนื้อแก้ว (Glass grade) จากกระบวนการควบคุมคุณภาพ

เกณฑ์ยอมรับ	ระดับความเป็นเนื้อเดียวกันเนื้อแก้ว			
	เกณฑ์ยอมรับ ไม่ต่ำกว่า C-			
วันที่	เตา A	เตา B	เตา C	เตา D
10-12-2562	B+(ผ่าน)	B+(ผ่าน)	B+(ผ่าน)	B+(ผ่าน)
9-12-2562	B+(ผ่าน)	B(ผ่าน)	B+(ผ่าน)	B(ผ่าน)
8-12-2562	B(ผ่าน)	B+(ผ่าน)	B+(ผ่าน)	B+(ผ่าน)
7-12-2562	B(ผ่าน)	B+(ผ่าน)	B+(ผ่าน)	B+(ผ่าน)

4.2 ทดลองการหลอมแก้วระดับห้องปฏิบัติการ และวัดผลเบื้องต้น

4.2.1 ผลการผสมจากเครื่องผสมระดับห้องปฏิบัติการ

จากการตรวจสอบด้วยสายตา พบว่าวัตถุดิบแต่ละชนิด อยู่ปะปนกันทั่วขวดรูปชมพู่ โดยไม่เกาะหรือกอดติดกัน ดังภาพที่ 4.3 อนุমানได้ว่าการผสมโดยใช้เครื่องผสมระดับห้องปฏิบัติการ แบบหมุน (Overhead shaker) สามารถผสมให้มีความเป็นเนื้อเดียวกัน









ภาพที่ 4.3 เครื่องผสมแบบหมุน Overhead รอบการหมุน 30 รอบต่อนาที และตัวอย่างส่วนผสม



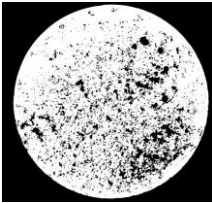
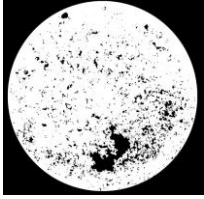
4.2.2 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการหลอม

จากตารางที่ 4.2 และ 4.3 เปรียบเทียบการหลอมของ 2 ตัวอย่างการทดลอง ณ สภาวะการหลอมเดียวกัน คือ อุณหภูมิ 1,250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง สามารถสรุปตั้งแนวโน้มนที่ปรากฏได้ว่าส่วนผสมที่ส่งผลให้หลอมง่ายกว่าคือตัวอย่าง B นั่นคือ การจัดลำดับการผสมช่วยให้หลอมได้ง่ายขึ้น จะเห็นจากรูปภาพเปรียบเทียบของการหลอม ว่าวัตถุดิบส่วนที่หลอมไม่หมด (สีขาว) มีน้อยกว่าตัวอย่างชิ้นงานที่ผสมแบบดั้งเดิม หากเปรียบเทียบเป็นข้อมูลเชิงปริมาณ คือ ปริมาณเฟสที่ไม่หลอม (non-melted) ของผิวหน้าก้อนแก้ว ได้แก่ A ร้อยละ 90, B ร้อยละ 83 ดังแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.2 ภาพตัดขวางของเนื้อแก้วส่องผ่านกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงโพลาไรซ์

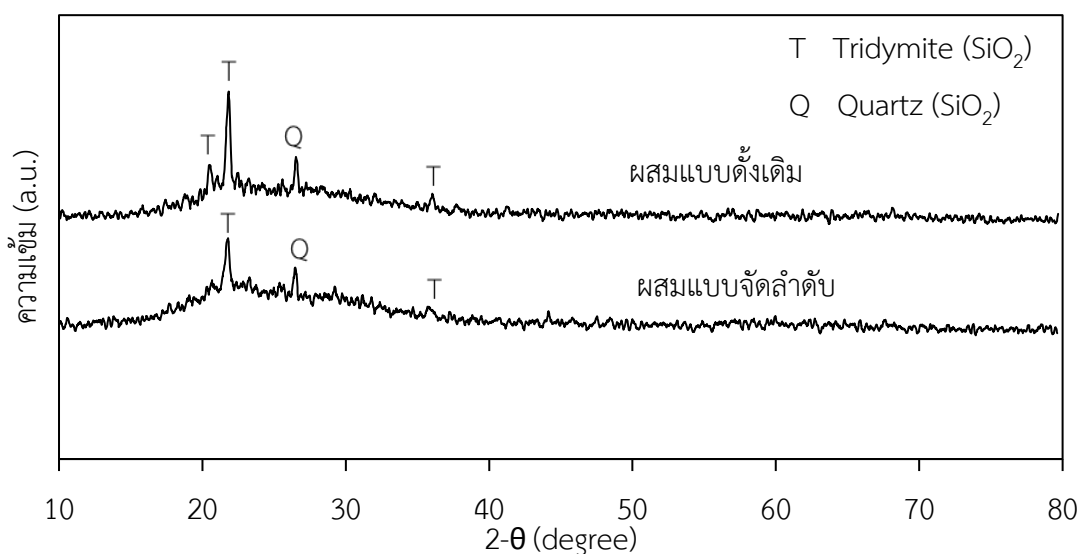
ตัวอย่าง	ผสมแบบดั้งเดิม	ผสมแบบจัดลำดับ
ภาพจากด้านบน แสดงพื้นผิวหน้า		
ภาพตัดขวาง (1)		
ภาพตัดขวาง (2)		

ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบสัดส่วนการหลอมจากการคำนวณผิวหน้าแก้ว โดยฟังก์ชัน Measurement Log โปรแกรมโฟโตซอป

ตัวอย่าง	ผสมแบบดั้งเดิม	ผสมแบบจัดลำดับ
ภาพจากด้านบน แสดงพื้นผิวหน้า		
ภาพจากด้านบน แสดงพื้นผิวหน้า (ผ่านโปรแกรม)		
พื้นที่ไม่หลอมเหลว (%)	90%	83%

#### 4.2.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสเบื้องต้น

ผลจากเทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ แสดงดังภาพที่ 4.4 เปรียบเทียบการหลอมของตัวอย่างการทดลอง ณ สภาวะการหลอมเดียวกัน คือ อุณหภูมิ 1,350 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ผลสอดคล้องกับสมมติฐาน นั่นคือ ตัวอย่างที่ผสมแบบดั้งเดิม พบเฟสของผลึกที่ไม่หลอมเหลว (Residual phase) หลงเหลืออยู่เป็นสัดส่วนที่สูงกว่า จากการคำนวณด้วยวิธี The Rietveld-internal standard โดยคิดเป็นผลึกรวมร้อยละ 9.93 ส่วนตัวอย่างที่ผสมด้วยวิธีจัดลำดับ พบผลึกเช่นเดียวกัน แต่น้อยกว่า โดยพบร้อยละ 6.76 โดยน้ำหนัก



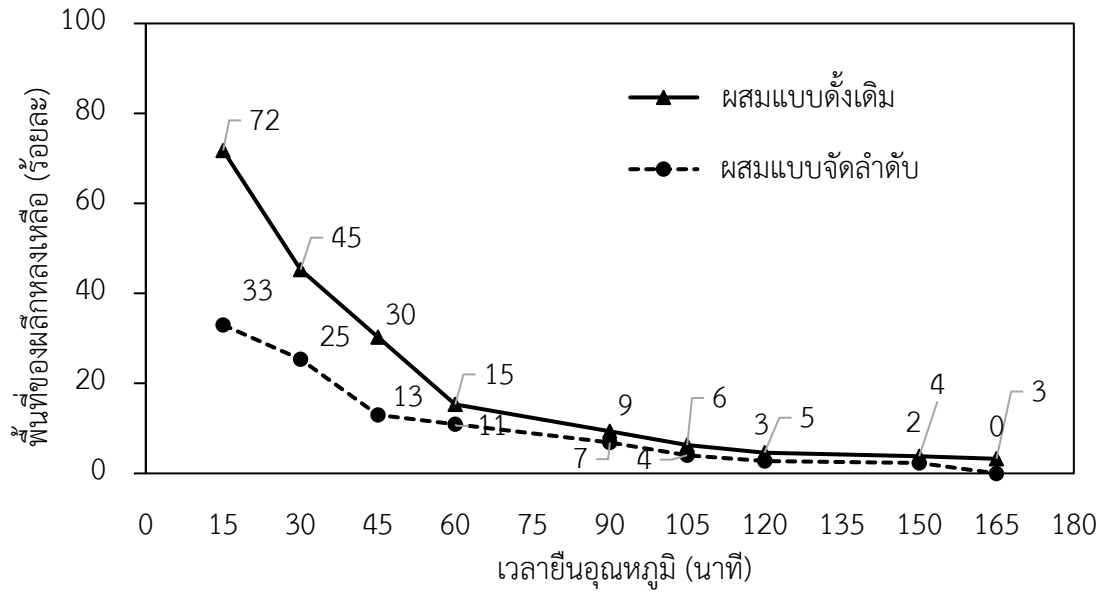
ภาพที่ 4.4 ผลวิเคราะห์รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ แสดงองค์ประกอบทางเฟสจากบริเวณผิวหน้าของตัวอย่างจากสองวิธีการผสม พบเฟสไทรดิไมต์ และควอตซ์ ที่ยังหลอมไม่หมด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

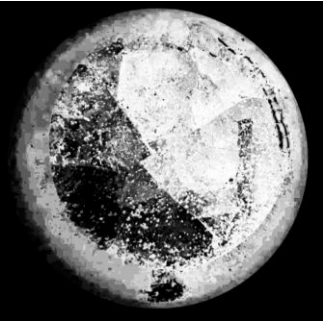
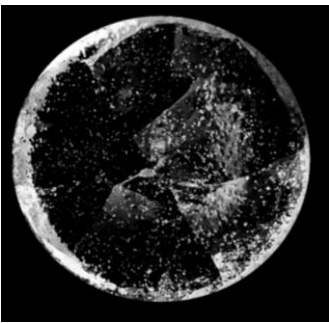
#### 4.3 ทดลองหา Batch free time

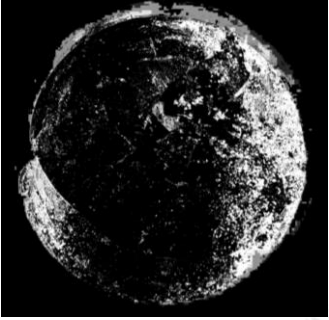
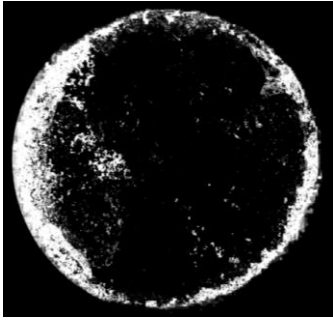
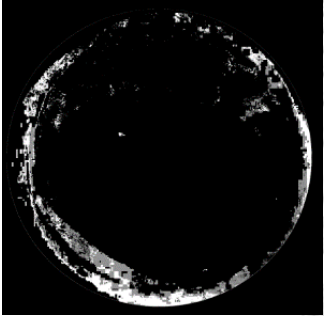
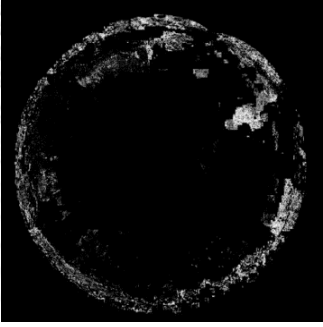
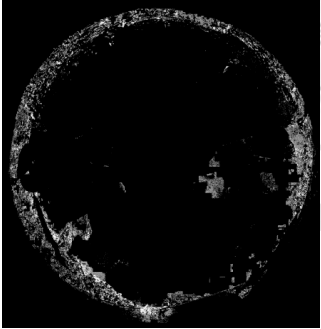
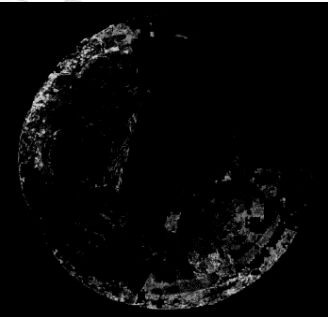
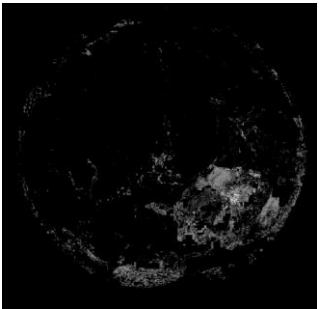
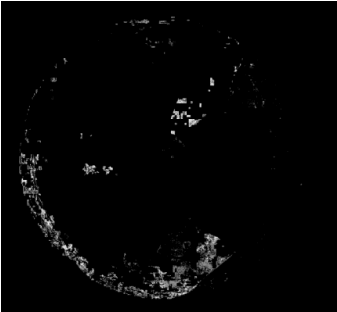
การหลอมส่วนผสม ณ อุณหภูมิคงที่ 1450 องศาเซลเซียส และเปลี่ยนแปลงเวลาในการเย็นอุณหภูมิของส่วนผสมในเตาหลอม เป็นการทดสอบ Batch free time หาเวลาที่ส่วนผสมหลอมเหลวเป็นน้ำแก้วหมด เปรียบเทียบจากปริมาณของส่วนผสมหรือผลึกที่หลงเหลือบนผิวหน้าของตัวอย่างแก้วในเข้าหลอม ระหว่างส่วนผสมด้วยวิธีปกติกับแบบจัดลำดับการผสม โดยใช้วิธีวิเคราะห์ภาพจากการปรับภาพถ่ายผิวหน้าของตัวอย่างในเข้าหลอมให้เป็นภาพขาว-ดำ ดังภาพที่ 4.6 สีขาวแทนผลึก ส่วนสีดำคือพื้นที่ที่หลอมเป็นเนื้อแก้ว จากนั้นคำนวณเป็นสัดส่วนต่อพื้นที่ทั้งหมด จากภาพที่ 4.5 ร้อยละของผลึกหลงเหลือของส่วนผสมแบบจัดลำดับแทนด้วยเส้นประ ต่ำกว่าส่วนผสมแบบดั้งเดิมทุก ๆ เวลาที่คงอุณหภูมิ ข้อสังเกตคือ เมื่อให้เวลาเย็นเพิ่มขึ้น ความต่างของผลึกที่หลงเหลือระหว่างสองวิธี


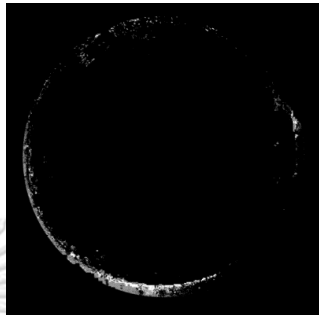
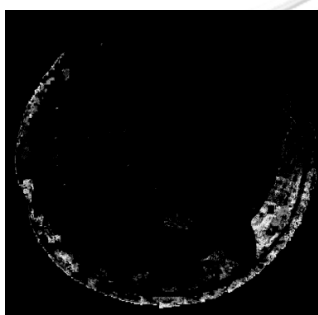

ผสมจะลดลง โดยที่เวลาหลอม 165 นาที ส่วนผสมโดยการจัดลำดับจะหลอมตัวหมด ในขณะที่ส่วนผสมโดยวิธีผสมดั้งเดิมเหลือวัตถุดิบที่ไม่หลอมตัวบนผิวหน้าเพียงร้อยละ 3



ภาพที่ 4. 5 แสดงผลบนผิวหน้าเข้าหลอมจากการทดสอบ Batch-free time

เวลาเย็น อุณหภูมิ (นาที)	ผสมแบบดั้งเดิม		ผสมแบบจัดลำดับ	
	รูปภาพจากฟังก์ชัน Measurement log	ผลึกหลงเหลือ (ร้อยละ)	รูปภาพจากฟังก์ชัน Measurement log	ผลึกหลงเหลือ (ร้อยละ)
30		45		25

เวลายืน อุณหภูมิตั้งเดิม (นาทิตั้งเดิม)	ผสมแบบตั้งเดิม		ผสมแบบจัดลำดับ	
	รูปภาพจากฟังก์ชัน Measurement log	ผลึกหลงเหลือ (ร้อยละ)	รูปภาพจากฟังก์ชัน Measurement log	ผลึกหลงเหลือ (ร้อยละ)
60		23		19
90		9.4		6.9
105		6.3		4.0
120		4.6		2.7

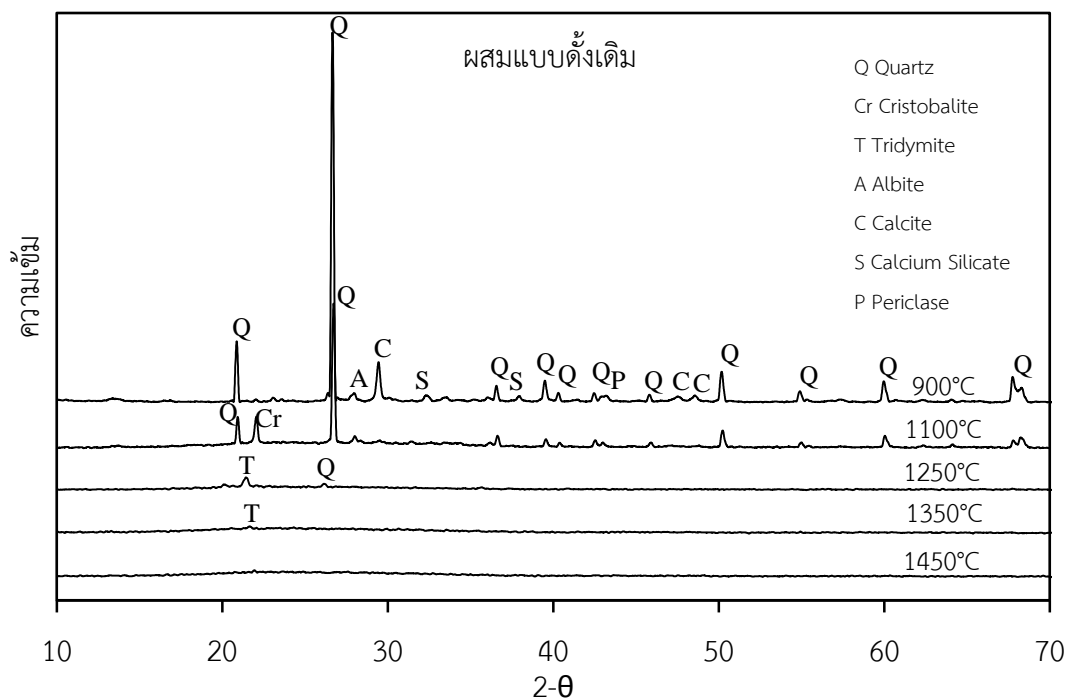
เวลายืน อุณหภูมิต (นาทิต)	ผลสมแบบตั้งเดิม		ผลสมแบบจัดลำดับ	
	รูปภาพจากฟังก์ชัน Measurement log	ผลลิกหลงเหลือ (รื้อยลละ)	รูปภาพจากฟังก์ชัน Measurement log	ผลลิกหลงเหลือ (รื้อยลละ)
150		3.8		2.4
165		3.2		0.0

ภาพที่ 4.6 ผลการทดสอบบนผิวหน้าเข้าหลอม

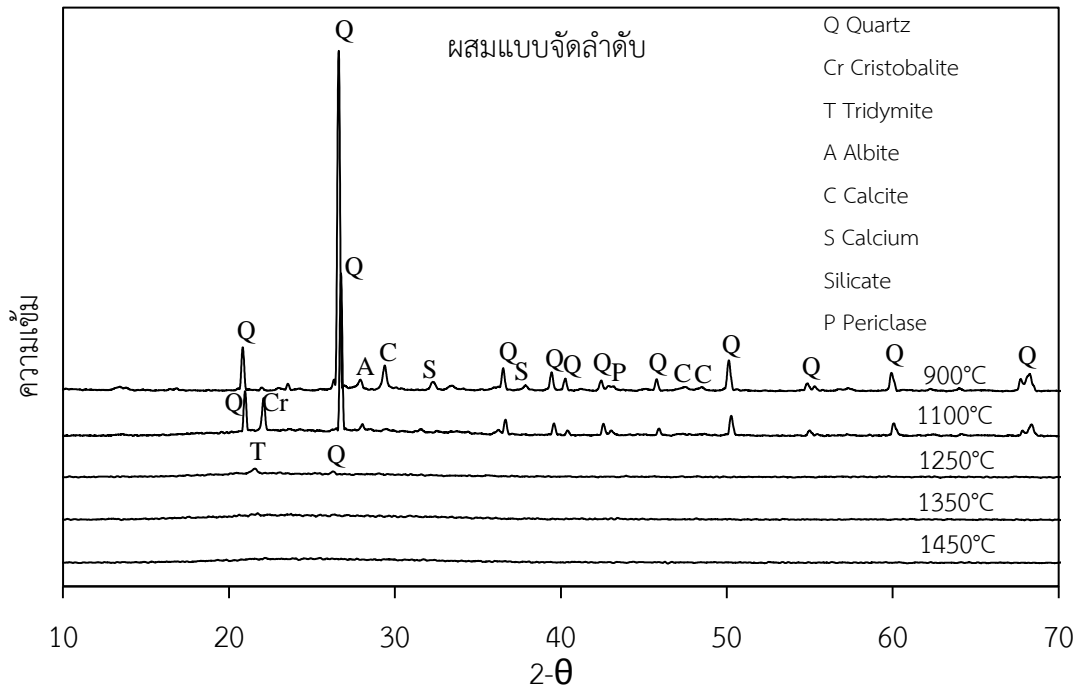


#### 4.5 การวิเคราะห์สมบัติทางเฟสของผลึกที่คงเหลืออยู่ โดยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD: X-ray Fluorescence Diffraction)

เพื่อยืนยันว่าสมบัติของแก้ว และพฤติกรรมกลอม ฌ แต่ละอุณหภูมิจะไม่เปลี่ยนแปลงไป เมื่อเปลี่ยนวิธีผสมเป็นแบบจัดลำดับ จากภาพที่ 4.7 และ 4.8 พบเฟสของผลึกที่หลงเหลืออยู่เหมือนกันทุกอุณหภูมิ ดังนี้ 900 องศาเซลเซียส พบควอตซ์ ( $\text{SiO}_2$ ), แอลไบต์ ( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ ), แคลไซต์ ( $\text{CaCO}_3$ ), แคลเซียมซิลิเกต ( $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$ ) เพอริเคลส ( $\text{MgO}$ ) ที่ 1100 องศาเซลเซียส นอกจากจะพบทุกเฟสเช่นเดียวกับที่ 900 องศาเซลเซียส ยังมีคริสโตบาไลต์ ( $\text{SiO}_2$ ) เพิ่มมาอีกด้วย และที่ 1250 องศาเซลเซียส ที่พบอย่างชัดเจนคือไทรดิไมต์ ( $\text{SiO}_2$ ) กับควอตซ์ เฟสอื่น ๆ ความเข้มข้น ส่วนการกลอมที่ 1350 และ 1450 องศาเซลเซียส ไม่พบผลึก จากตัวอย่างทั้งสองวิธีผสม

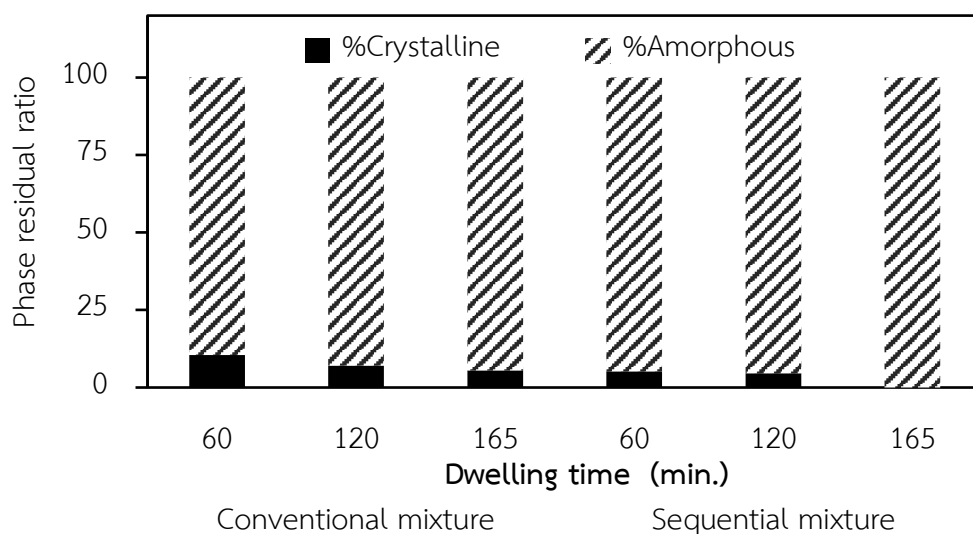


ภาพที่ 4.7 ผลวิเคราะห์รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ แสดงองค์ประกอบเฟสของส่วนผสมจากการผสมแบบดั้งเดิม ที่อุณหภูมิต่าง ๆ



ภาพที่ 4.8 ผลวิเคราะห์รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ แสดงองค์ประกอบเฟสของส่วนผสมจากการผสมแบบจัดลำดับ ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

สำหรับเงื่อนไขที่กำหนดอุณหภูมิหลอมคงที่ 1450 องศาเซลเซียส และเปลี่ยนแปลงเวลาในการย่นอุณหภูมิของส่วนผสมในเตาหลอม เป็นการทดสอบ Batch free time โดยใช้ตัวอย่างเวลาการย่นอุณหภูมิตั้งที่ 60, 120 และ 165 นาที คำนวณสัดส่วนระหว่างผลึกและอสัณฐานจากตัวอย่างของการทดสอบ Batch-free time จากภาพที่ 4.9 แนวโน้มของผลการคำนวณสอดคล้องกับผลจากภาพถ่ายมูมบน



ภาพที่ 4.9 สัดส่วนระหว่างผลึกและอสัณฐานจากตัวอย่างของการทดสอบ Batch-free time

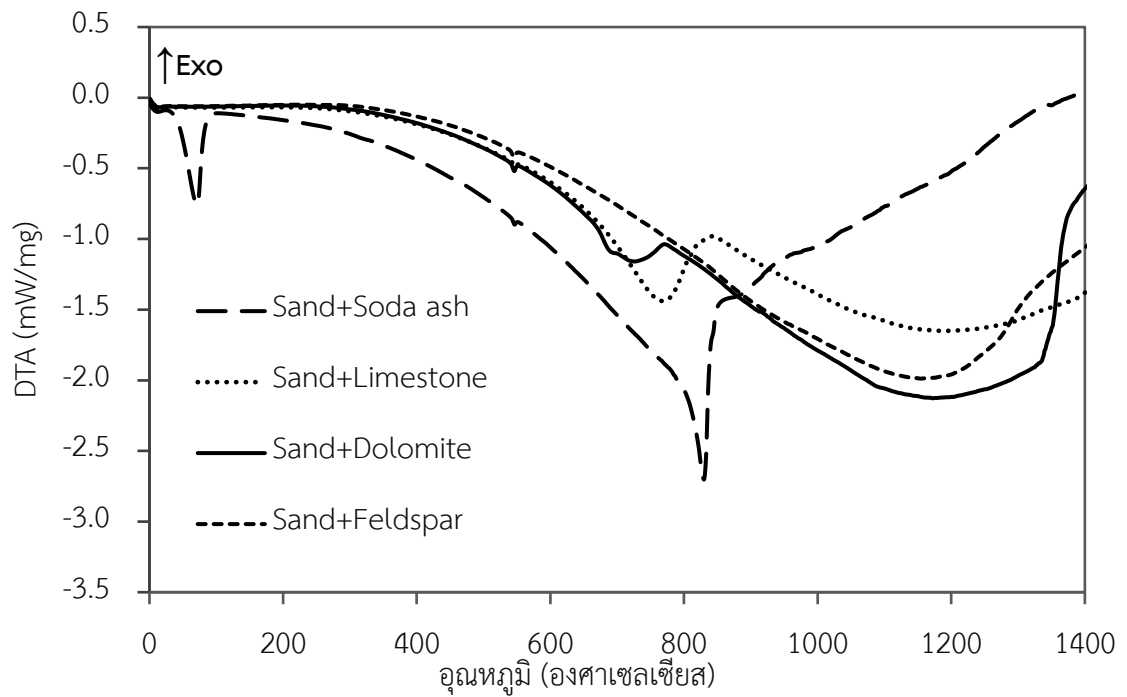
4.6 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน โดยเทคนิคการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อน (DTA: Differential Thermal Analysis) และเทคนิคการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเนื่องจากความร้อน (TGA: Thermogravimetric Analysis)

#### 4.6.1 การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของระหว่างวัตถุบสองชนิด

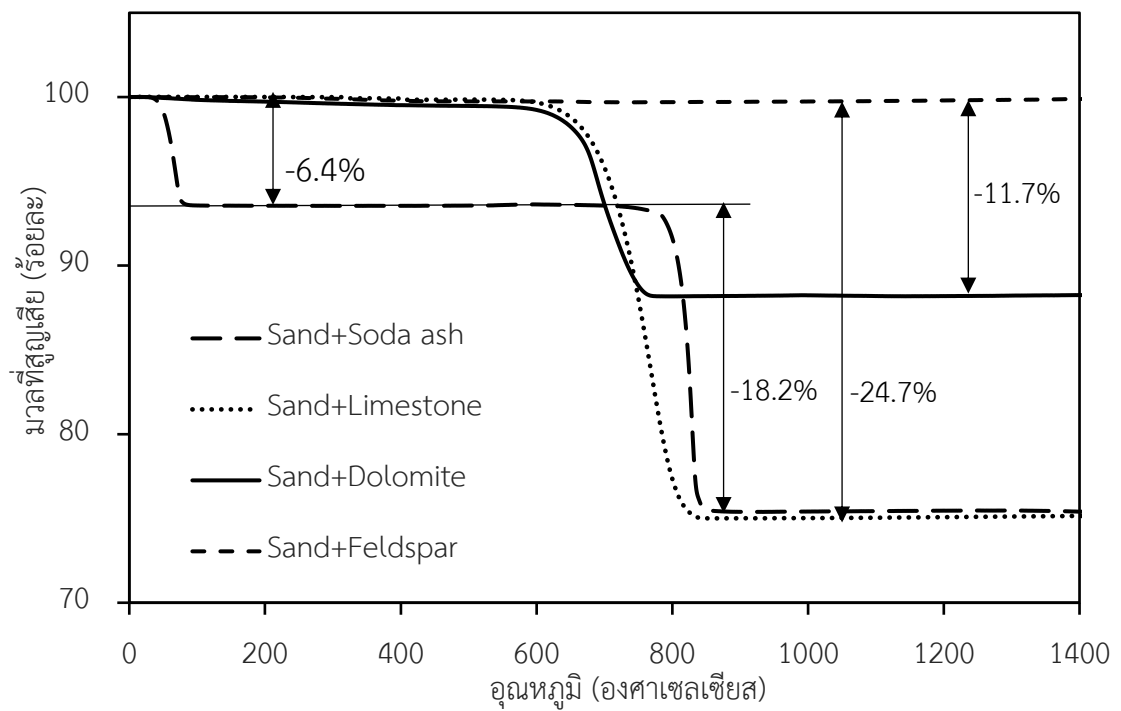
การศึกษาสมบัติทางความร้อนโดยการผสมวัตถุบสองชนิดเข้าด้วยกันแล้วนำไปวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน ผลวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของตัวอย่างซึ่งประกอบไปด้วยวัตถุบ 2 ชนิด สัดส่วนการผสม 1 ต่อ 1 แบ่งเป็นการทดสอบระหว่างทรายกับวัตถุบอื่น ดังแสดงในภาพที่ 4.10 และ 4.11 และการทดสอบสมบัติทางความร้อนระหว่างวัตถุบที่เกิดปฏิกิริยาในรูปของแข็ง ได้แก่ ทราย-โซดาแอช ทราย-หินปูน และโซดาแอช-หินปูน ดังแสดงในภาพที่ 4.12 และ 4.13

เปรียบเทียบจุดเริ่มต้นเกิดปฏิกิริยาของทราย-โซดาแอช ในการสร้างโซเดียมซิลิเกต เพื่อให้เกิดของเหลวและเร่งการเกิดปฏิกิริยา เทียบกับวัตถุบอื่น ๆ แต่ทั้งนี้จากผลการวิเคราะห์และงานวิจัยที่ผ่านมา ลำดับการเกิดปฏิกิริยาของระบบสององค์ประกอบจะต่อวัตถุบประสงคนี้ไม่ได้เสียทีเดียว เนื่องจากมีระบบอื่นที่เกิดการสลายตัว ณ อุณหภูมิที่ต่ำกว่าโซดาแอช จึงทำการวิเคราะห์ระบบสององค์ประกอบของวัตถุบที่มีส่วนในการเกิดปฏิกิริยาในสถานะของแข็งของน้ำแก้วเพิ่มเติมสรุปได้ว่าขอบเขตของช่วงอุณหภูมิที่งานวิจัยนี้สนใจคือตั้งแต่ 650 – 900 องศาเซลเซียส เนื่องจากเป็นจุดเริ่มต้นที่คาดว่า การอยู่ชิดกันของทรายและโซดาแอชจะส่งผลต่อการหลอมของทั้งระบบ

จากผลวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของตัวอย่างซึ่งประกอบไปด้วยวัตถุบ 2 ชนิด สำหรับทราย-โซดาแอช พบพีคของปฏิกิริยาคูดความร้อนที่ 97 องศาเซลเซียสของกระบวนการขจัดน้ำ ต่อมาที่พีคูดความร้อน ณ อุณหภูมิ 573 องศาเซลเซียส พบในทุกผลวิเคราะห์ที่มีทราย นั่นคือ พีคของการเปลี่ยนโครงสร้างผลึกของควอตซ์แบบเปลี่ยนกลับเป็นแบบเดิมได้ (displacive transformation) ต่อมาที่ช่วงอุณหภูมิ 750 – 850 องศาเซลเซียส พบพีคของการสร้างโซเดียมซิลิเกต ได้แก่ โซเดียมเมทาซิลิเกต ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) และโซเดียมไดซิลิเกต ( $\text{Na}_2\text{Si}_2\text{O}_5$ ) และสลายคาร์บอนไดออกไซด์ สอดคล้องกับมวลที่หายไปดังกราฟ TGA ภาพที่ 4.12 กราฟของทราย-หินปูน พบพีคของการสลายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 700 – 830 องศาเซลเซียส แต่ไม่พบพีคของการเกิดแคลเซียมซิลิเกต ณ 1200 องศาเซลเซียส<sup>[32]</sup> เส้นกราฟทราย-โดโลไมต์ พบพีคของการสลายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 650 – 780 องศาเซลเซียส ส่วนทราย-หินปูน จากกราฟไม่พบพีคที่แสดงการเกิดปฏิกิริยา

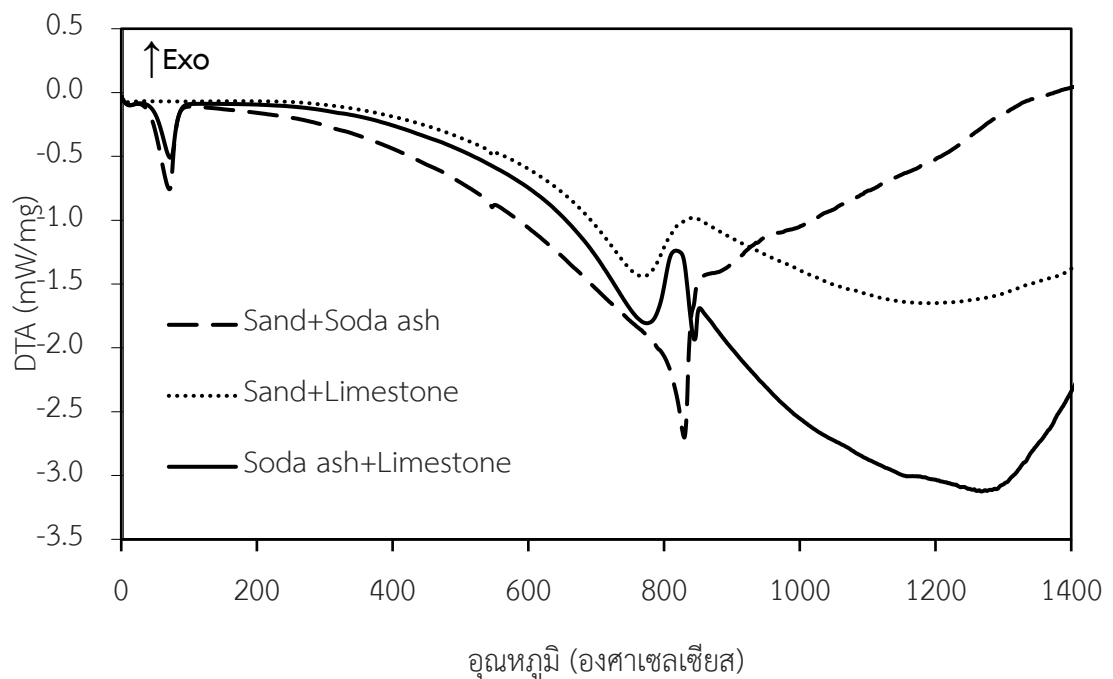


ภาพที่ 4.10 กราฟ DTA ของ 2 องค์ประกอบ ระหว่างทรายกับวัสดุดิบอื่น ๆ

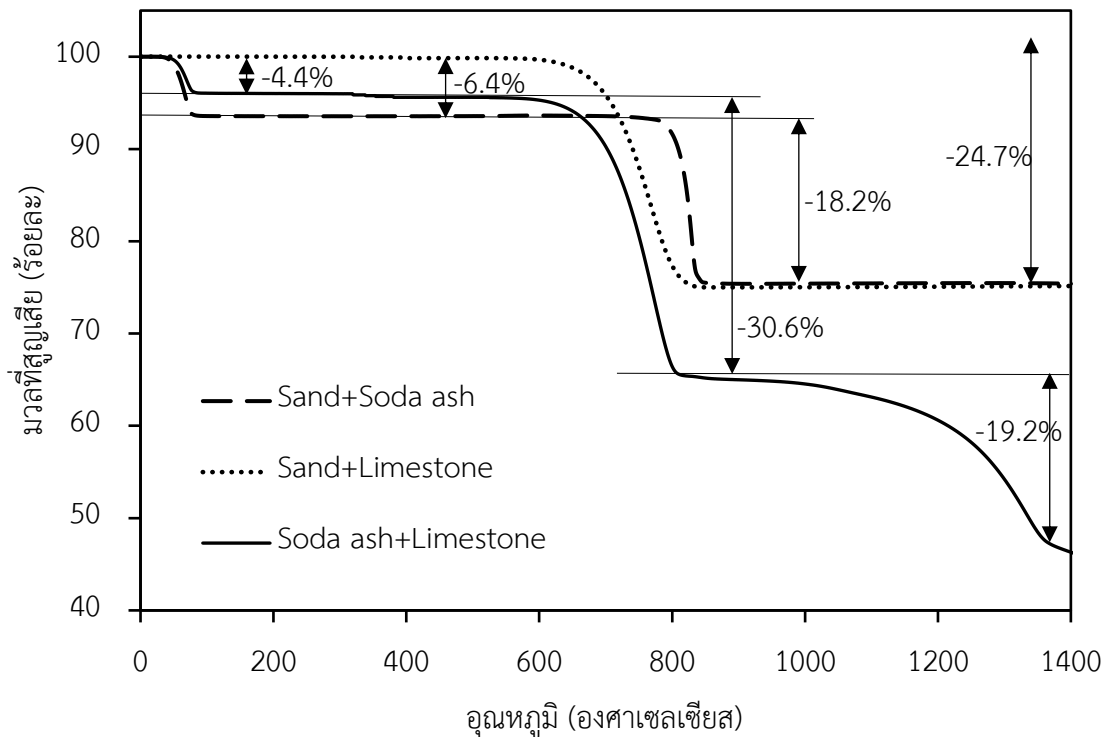


ภาพที่ 4.11 กราฟ TGA ของ 2 องค์ประกอบ ระหว่างทรายกับวัสดุดิบอื่น ๆ

และสำหรับภาพที่ 4.12 และ 4.13 เป็นการศึกษาปฏิกิริยาทางความร้อนระหว่างคู่วัตถุดิบที่เกิดปฏิกิริยาในสถานะของแข็ง (Solid-state reaction) นอกจากองค์ประกอบที่ได้กล่าวไปแล้ว กราฟของโซดาแอส-หินปูนที่แทนด้วยเส้นสีเขียว พบการสลายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์ หลงเหลือแคลเซียมออกไซด์และโซเดียมออกไซด์ กล่าวคือโดยรวมอุณหภูมิที่เกิดปฏิกิริยาในสถานะของแข็งที่เป็นปฏิกิริยาคูดความร้อนเกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 650 – 900 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 4.12 กราฟ DTA ของ 2 องค์ประกอบ ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่เกิดปฏิกิริยาในสถานะของแข็ง



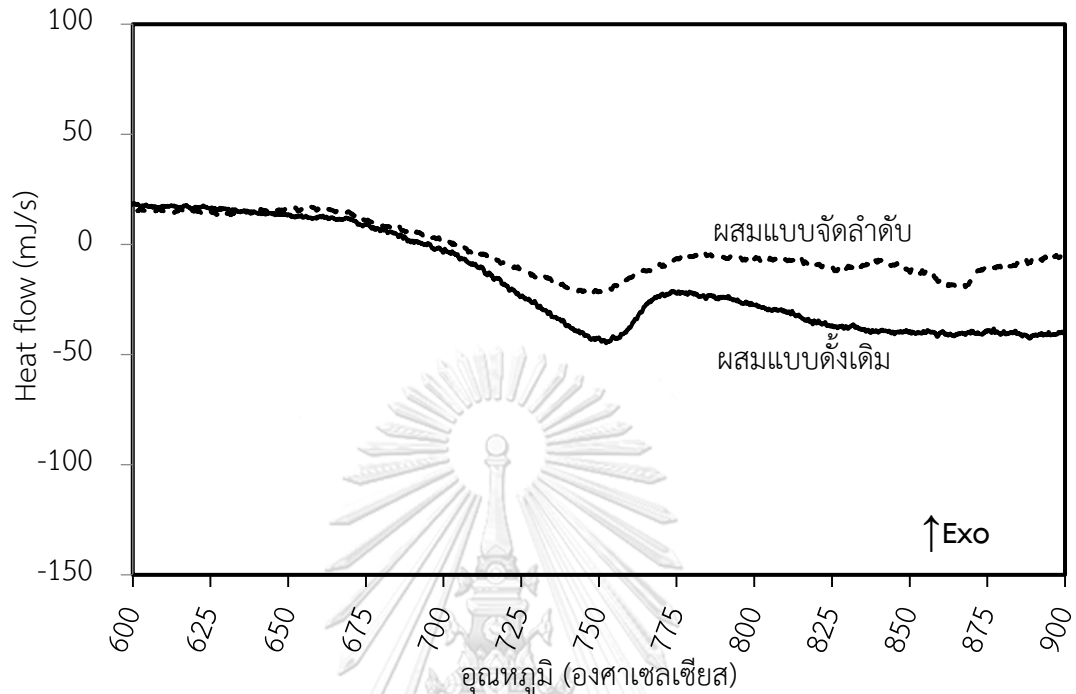
ภาพที่ 4.13 กราฟ TGA ของ 2 องค์ประกอบ ซึ่งเป็นวัสดุที่ก่อให้เกิดปฏิกิริยาในสถานะของแข็ง

#### 4.6.2 การเปรียบเทียบสมบัติทางความร้อนของส่วนผสมที่เตรียมด้วยวิธีปกติและจัดลำดับการผสม

ทำการวิเคราะห์ส่วนผสมของทุกวัสดุ ปฏิกิริยาระหว่าง 2 องค์ประกอบ ททรายและโซดาแอช เริ่มต้นที่ประมาณ 760 องศาเซลเซียส<sup>[32]</sup> เกิดเป็นโซเดียมเมตาซิลิเกต ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) และไดซิลิเกต ( $\text{Na}_2\text{Si}_2\text{O}_5$ ) ล้อมรอบเม็ดเกรนซิลิกา ในขณะที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) ถูกปลดปล่อย จากนั้นเมื่อมีของเหลวเกิดในระบบก็จะยิ่งช่วยเร่งปฏิกิริยาระหว่างเม็ดเกรนซิลิกานี้กับโซเดียมซิลิเกตที่มีหลากหลายรูปแบบ<sup>[33]</sup> แนวโน้มของความสามารถในการหลอมที่เร็วกว่าของการผสมแบบจัดลำดับจึงเป็นไปได้ ในทางปฏิบัติคาดว่าจะสามารถลดการใช้พลังงานได้ สอดคล้องกับผลการทดลอง ระดับอุตสาหกรรม

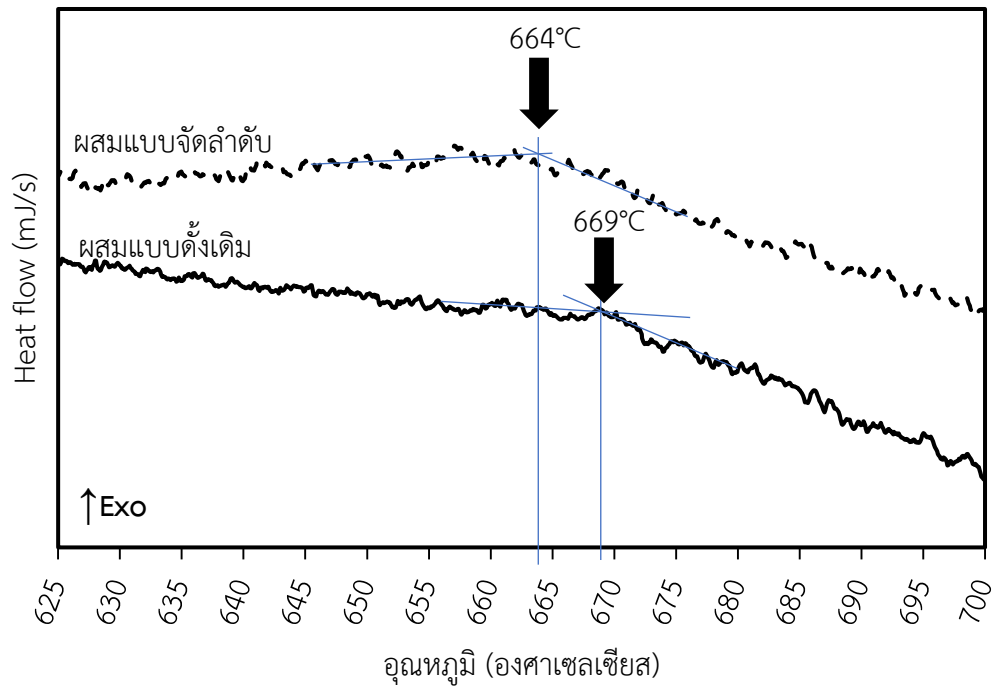
จากกราฟการเปลี่ยนแปลง ช่วงอุณหภูมิ 600 - 900 องศาเซลเซียส ที่เป็นช่วงที่วัสดุเริ่มเกิดปฏิกิริยาในสถานะของแข็งระหว่างแต่ละวัสดุและของทั้งระบบ รวมถึงการปลดปล่อยแก๊ส<sup>[27, 32]</sup> จากภาพที่ 4.14 ให้ความร้อนที่อัตรา 5 องศาเซลเซียสต่อนาที เส้นโค้งของปฏิกิริยาดูดความร้อนของส่วนผสมแบบดั้งเดิม และแบบจัดลำดับมีลักษณะคล้ายกัน แต่จุดที่เริ่มเกิดการเกิดปฏิกิริยา (onset) ของส่วนผสมแบบจัดลำดับเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่า จะเห็นได้จากภาพที่ 4.14 คือ 664 องศาเซลเซียส ในขณะที่จุดเริ่มต้นปฏิกิริยาดูดความร้อนของส่วนผสมแบบดั้งเดิมเริ่มเกิดที่อุณหภูมิ 669 องศาเซลเซียส ถัดมาจะพบพีคของกราฟการเปลี่ยนแปลงแบบดูดความร้อน (endothermic peak)

โดยส่วนผสมแบบจัดลำดับ จากภาพที่ 4.16 จุดพีคอยู่ที่ 747 และแบบดั้งเดิมอยู่ที่ 754 องศาเซลเซียส แนวโน้มสอดคล้องกับจุด onset

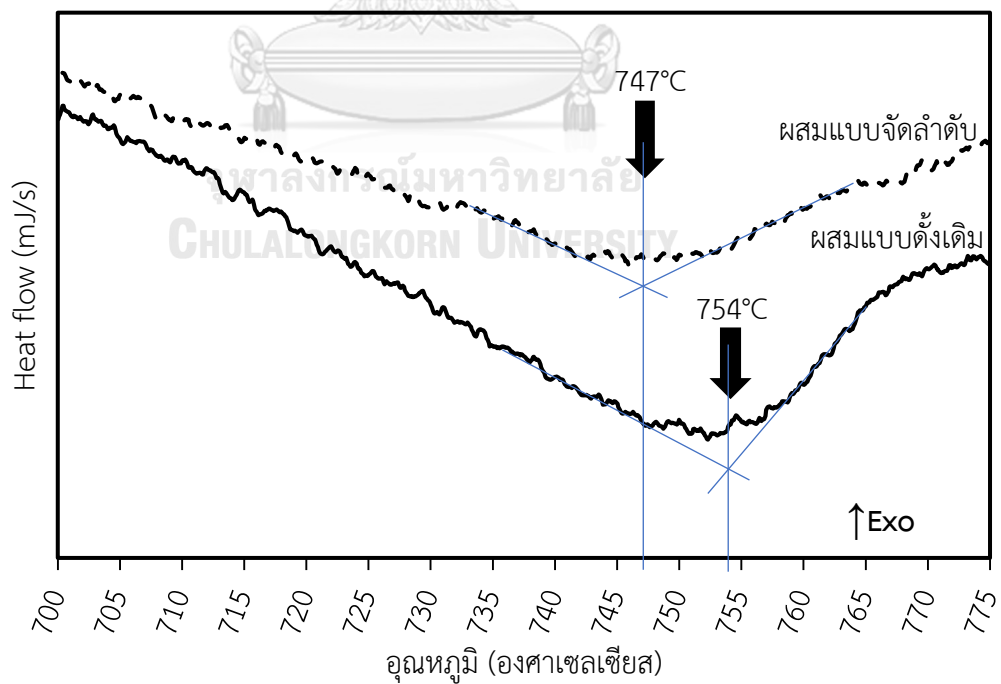


ภาพที่ 4.14 กราฟ DSC ของส่วนผสมทั้งหมด คือ ทราย โซดาแอช หินฟืนม้า หินปูน และโดโลไมต์ ที่อัตราการให้ความร้อน 5 องศาเซลเซียสต่ออนาที



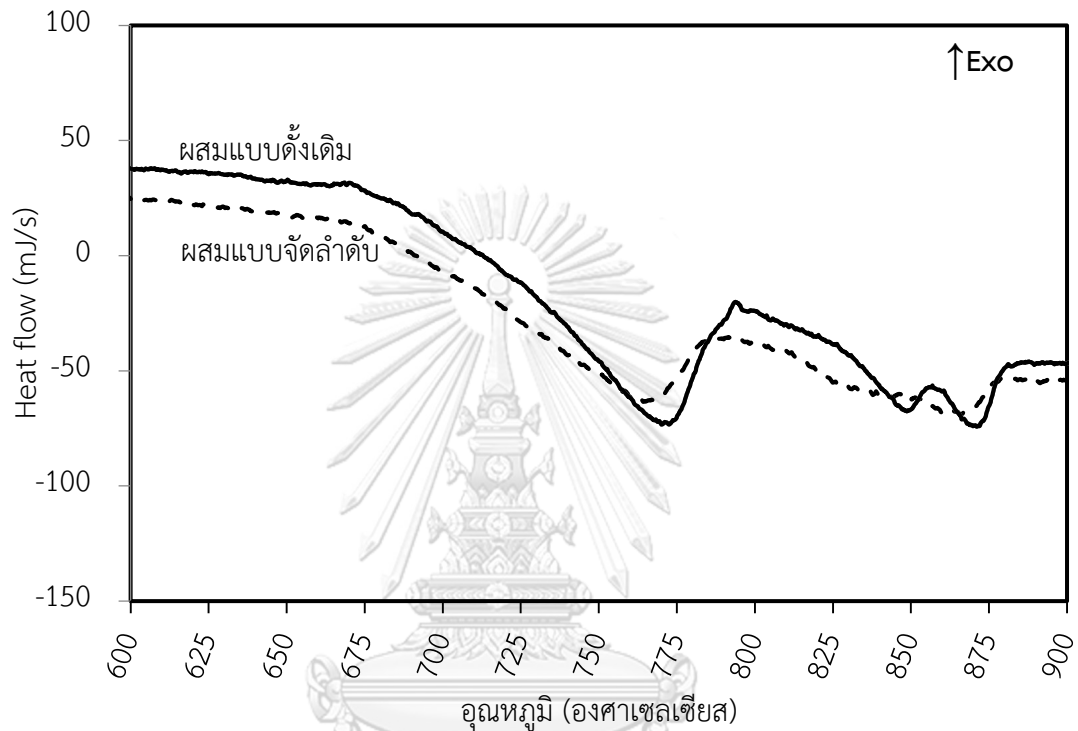


ภาพที่ 4.15 กราฟ DSC ของส่วนผสมที่อัตราการให้ความร้อน 5 องศาเซลเซียสต่อนาที แบบขยายที่ ช่วงอุณหภูมิ 625 – 700 องศาเซลเซียส เพื่อหาจุด onset

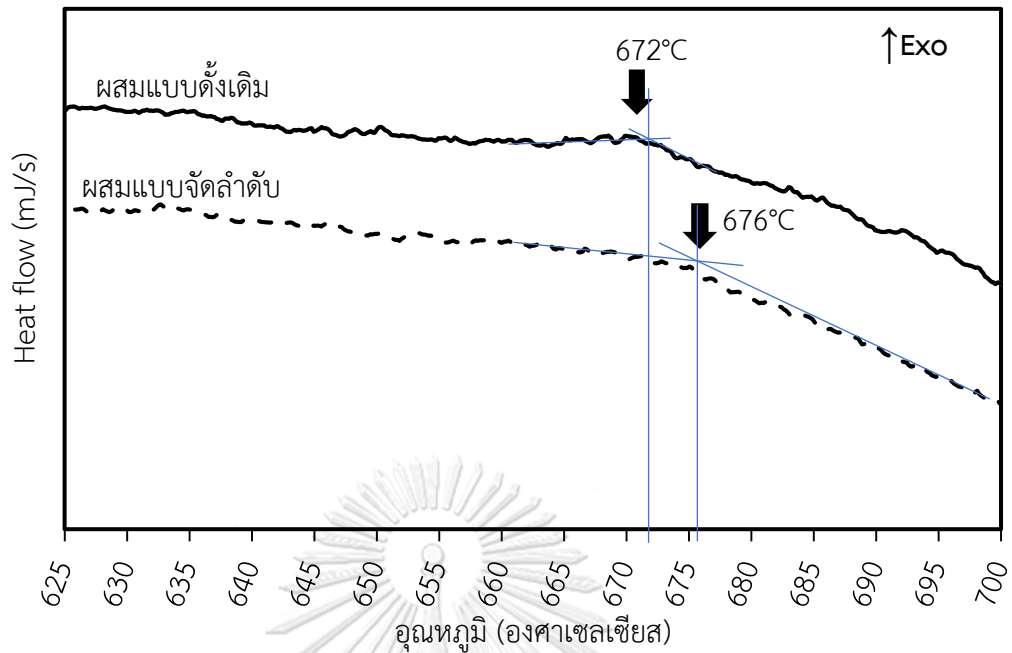


ภาพที่ 4.16 กราฟ DSC ของส่วนผสมที่อัตราการให้ความร้อน 5 องศาเซลเซียสต่อนาที แบบขยายที่ ช่วงอุณหภูมิ 700 – 775 องศาเซลเซียส เพื่อหาจุดพีคของการเปลี่ยนแปลงแบบดูดความร้อน

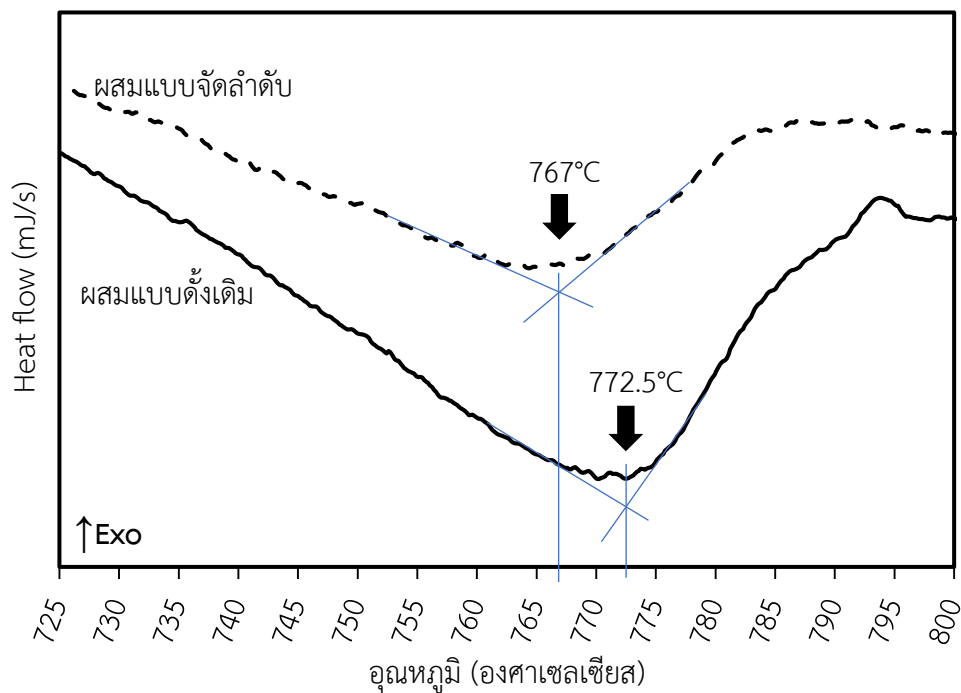
จากภาพที่ 4.17 กำหนดอัตราการให้ความร้อนที่ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที จุด onset ดังภาพที่ 4.18 ส่วนผสมของการจัดลำดับเริ่มคือ 673 องศาเซลเซียส ส่วนผสมแบบดั้งเดิมเริ่มเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่ำกว่าเล็กน้อย 676 องศาเซลเซียส จุดพีคของการเปลี่ยนแปลงแบบดูดความร้อนอยู่ที่ 767 และ 772.5 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ดังภาพที่ 4.19



ภาพที่ 4.17 กราฟ DSC ของส่วนผสมทั้งหมด คือ ทราย โซดาแอช หินฟืนม้า หินปูน และโดโลไมต์ ที่อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที

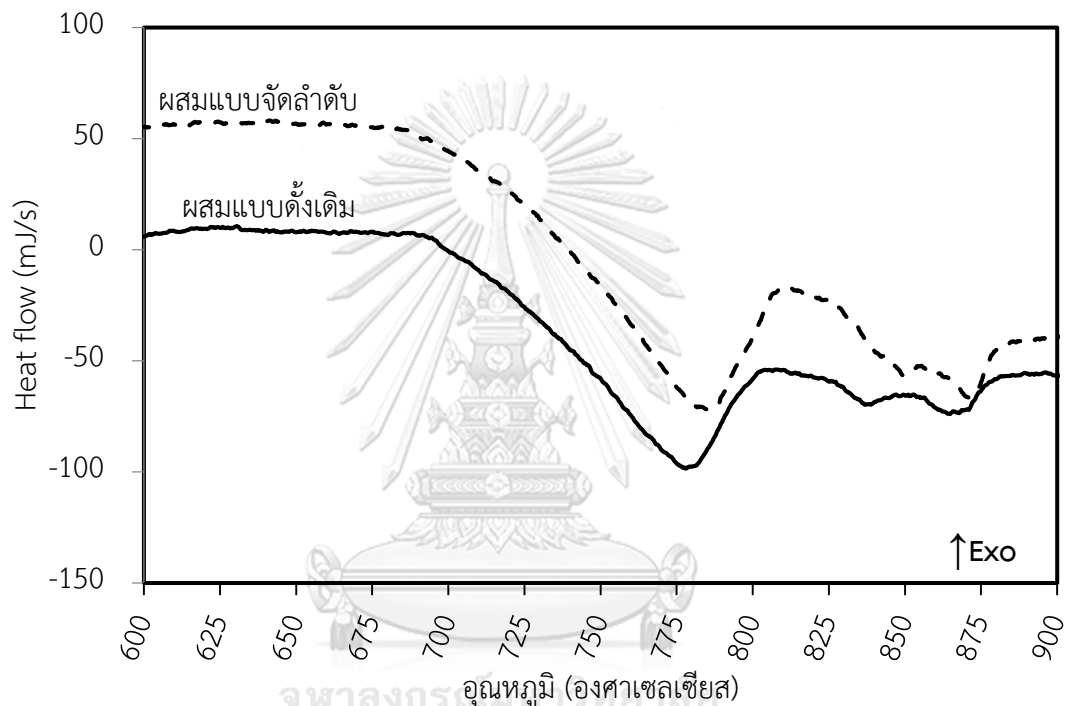


ภาพที่ 4.18 กราฟ DSC ของส่วนผสม อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที แบบขยายที่ ช่วงอุณหภูมิ 625 – 700 องศาเซลเซียส เพื่อหาจุด onset

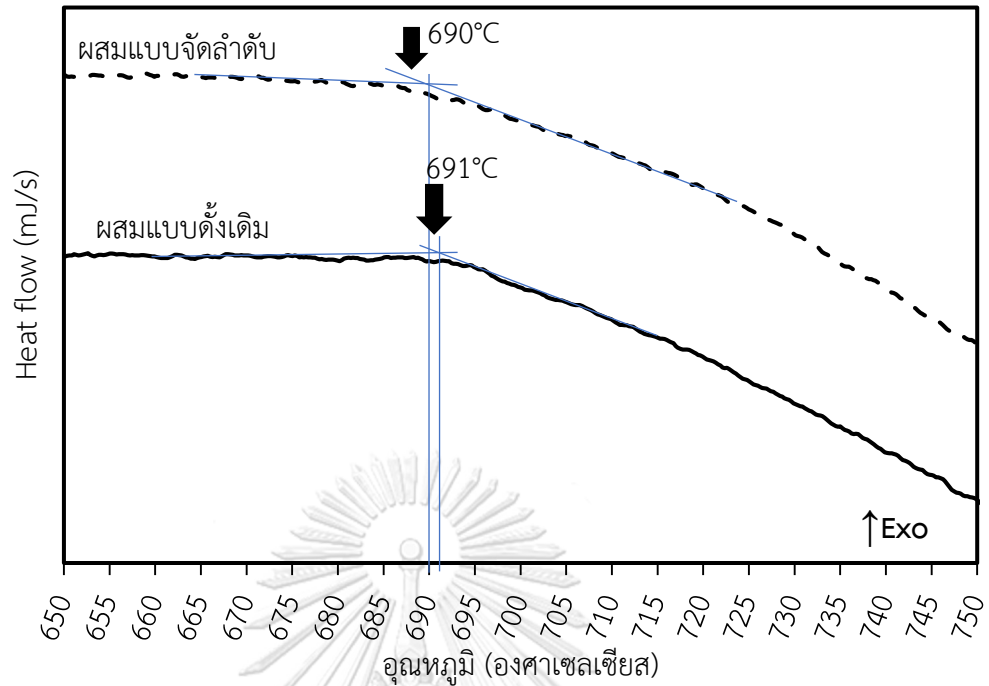


ภาพที่ 4.19 กราฟ DSC ของส่วนผสม อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที แบบขยายที่ ช่วงอุณหภูมิ 725 – 800 องศาเซลเซียส เพื่อหาจุดพีคของการเปลี่ยนแปลงแบบดูดความร้อน

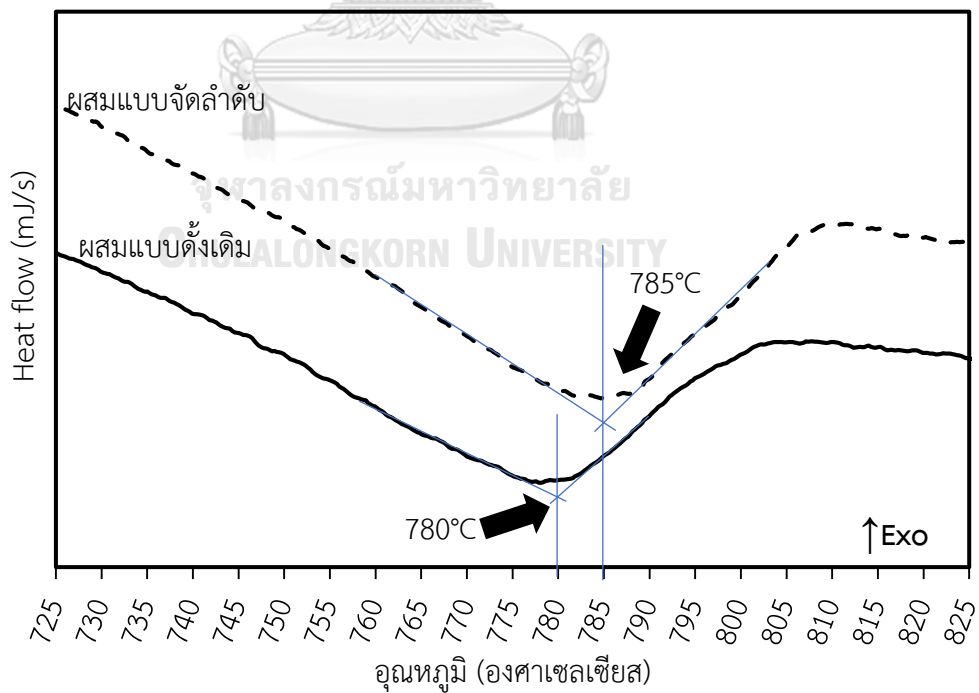
จากภาพที่ 4.20 กำหนดอัตราการให้ความร้อนที่ 15 องศาเซลเซียสต่อนาที พบจุด onset ของส่วนผสมแบบจัดลำดับเกิดที่อุณหภูมิ 689 องศาเซลเซียส ส่วนแบบดั้งเดิมเริ่มช้ากว่าเล็กน้อยที่ 690 องศาเซลเซียส ต่อมาจุดพีคบนเส้นโค้งของการเปลี่ยนแปลงแบบดูดความร้อน พบว่าต่างจากแนวโน้มของอัตราการให้ความร้อนอื่น คือตัวอย่างส่วนผสมแบบจัดลำดับพบจุดพีคอยู่ที่ 785 ที่อุณหภูมิสูงกว่าตัวอย่างส่วนผสมแบบดั้งเดิม ซึ่งจุดพีคอยู่ที่ 780 องศาเซลเซียส ดังภาพที่ 4.21 และ 4.22 ตามลำดับ



ภาพที่ 4.20 กราฟ DSC ของส่วนผสมทั้งหมด คือ ทราย โซดาแอช หินฟืนม้า หินปูน และโดโลไมต์ ที่อัตราการให้ความร้อน 15 องศาเซลเซียสต่อนาที

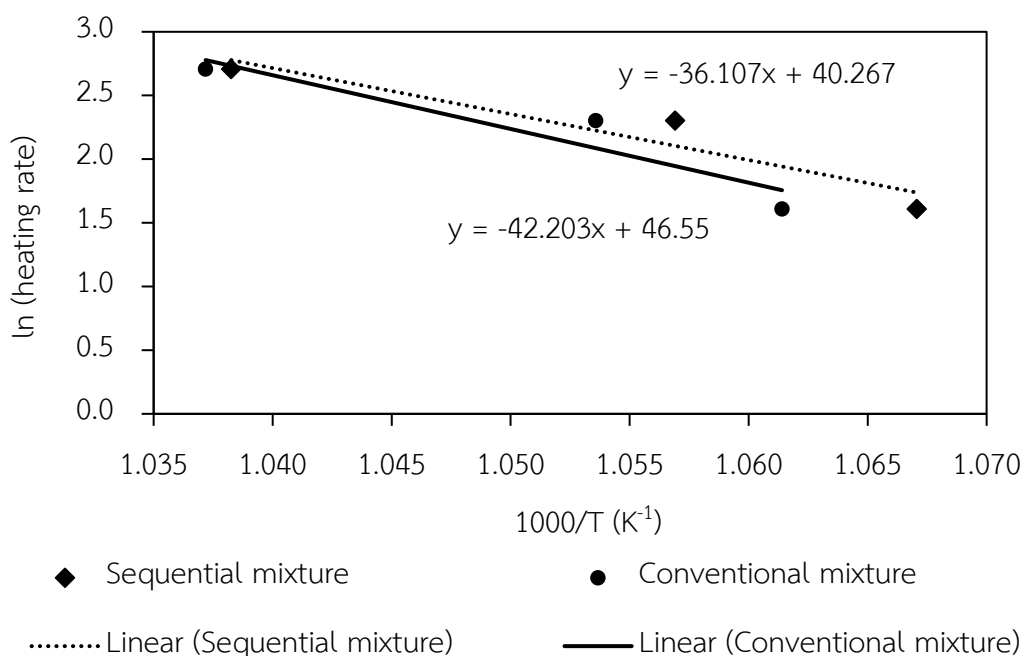


ภาพที่ 4.21 กราฟ DSC ของส่วนผสม อัตราการให้ความร้อน 15 องศาเซลเซียสต่อนาที แบบขยายในช่วงอุณหภูมิ 650 – 750 องศาเซลเซียส เพื่อหาจุด onset



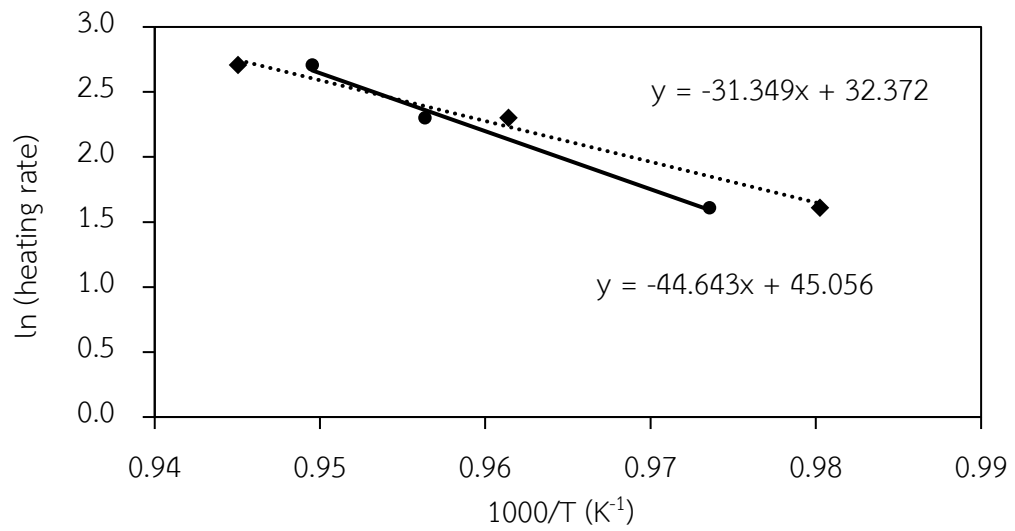
ภาพที่ 4.22 กราฟ DSC ของส่วนผสม อัตราการให้ความร้อน 15 องศาเซลเซียสต่อนาที แบบขยายที่ ช่วงอุณหภูมิ 725 – 825 องศาเซลเซียส เพื่อหาจุดพีคของการเปลี่ยนแปลงแบบดูดความร้อน

นอกจากนี้ นำข้อมูลที่ได้จากหลายอุณหภูมิที่มีการเกิดจุดพีคของปฏิกิริยามา plot กราฟ เพื่อหาความชันจากสมการเส้นตรง ด้วยวิธีของ Ozawa<sup>[30, 31]</sup> ดังภาพที่ 4.23, 4.24 และวิธี Kissinger<sup>[28, 29]</sup> ดังภาพที่ 4.25, 4.26 จากนั้นนำความชันมาคำนวณหาค่าพลังงานกระตุ้น (activation energy) ดังตารางที่ 4.4 และ 4.5 ตามลำดับ ค่าที่ได้ใกล้เคียงกัน สอดคล้องกับผลทดสอบอื่น ๆ ที่ได้กล่าวมาข้างต้น คือ เมื่อผสมแบบจัดลำดับ พลังงานกระตุ้นสำหรับแต่ละปฏิกิริยาในช่วงแรกเริ่มของการเกิดปฏิกิริยาค่าต่ำกว่าการผสมแบบดั้งเดิม ดังนั้น การผสมแบบจัดลำดับ จึงต้องการพลังงานในการหลอมต่ำกว่า



ภาพที่ 4.23 กราฟ Ozawa ของจุดเริ่มเกิดปฏิกิริยา

จากการทดสอบทางความร้อนด้วย 3 heating rate คือ 5, 10 และ 15 องศาเซลเซียสต่อนาที



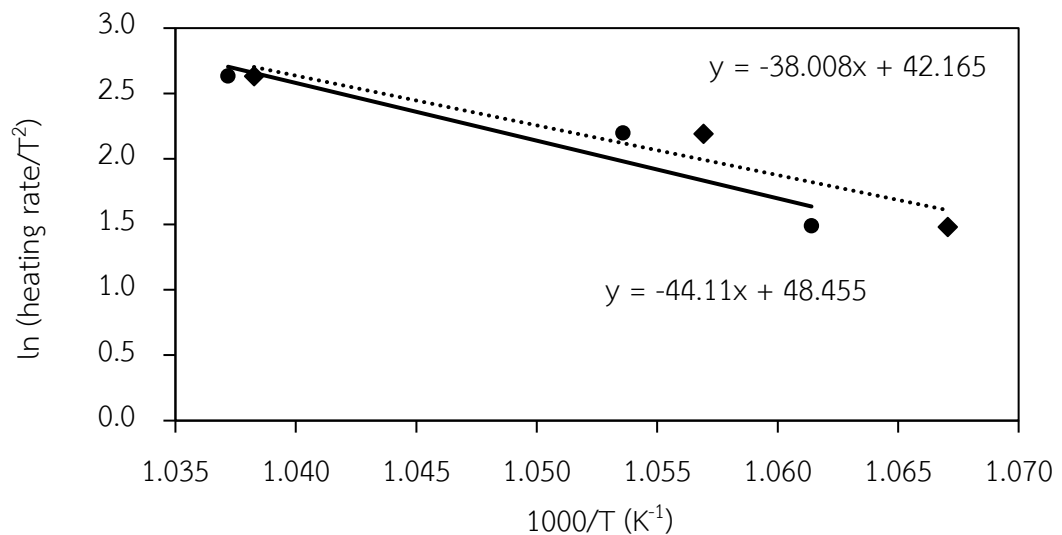
◆ Sequential mixture

● Conventional mixture

..... Linear (Sequential mixture)

—— Linear (Conventional mixture)

ภาพที่ 4.24 กราฟ Ozawa ของจุดพีคของการเปลี่ยนแปลงแบบดูดความร้อนจากการทดสอบทางความร้อนด้วย 3 heating rate คือ 5, 10 และ 15 องศาเซลเซียสต่อนาที



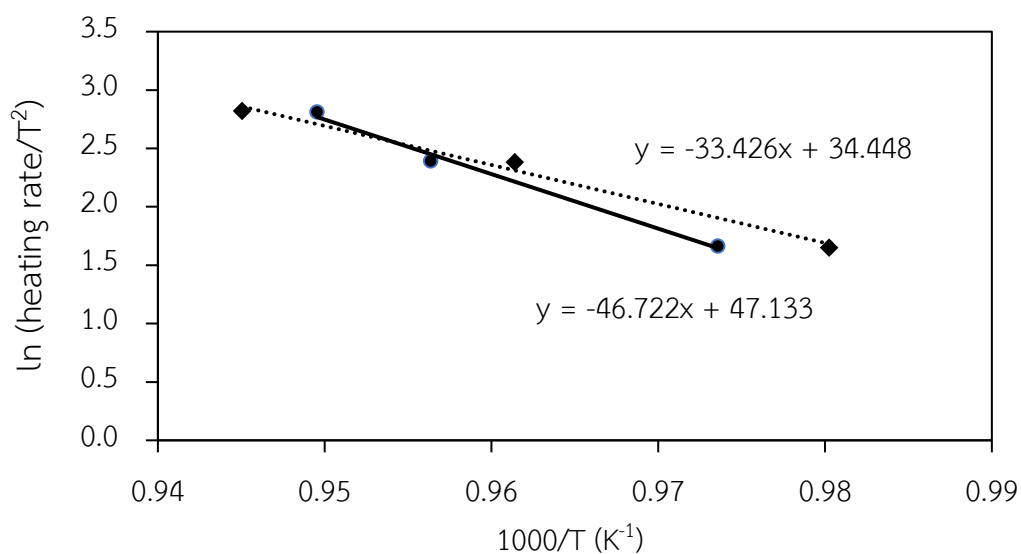
◆ Sequential mixture

● Conventional mixture

..... Linear (Sequential mixture)

—— Linear (Conventional mixture)

ภาพที่ 4.25 กราฟ Kissinger ของจุดเริ่มเกิดปฏิกิริยาจากการทดสอบทางความร้อนด้วย 3 heating rate คือ 5, 10 และ 15 องศาเซลเซียสต่อนาที



◆ Sequential mixture

● Conventional mixture

..... Linear (Sequential mixture)

— Linear (Conventional mixture)

ภาพที่ 4.26 กราฟ Kissinger ของจุดพีคของการเปลี่ยนแปลงแบบดูดความร้อนจากการทดสอบทางความร้อนด้วย 3 heating rate คือ 5, 10 และ 15 องศาเซลเซียสต่ออนาที

ตารางที่ 4.4 ค่าพลังงานกระตุ้นจากการคำนวณและแปลงด้วยวิธีของ Ozawa

activation energy (kJ/mol)	onset	endothermic peak
ส่วนผสมแบบจัดลำดับ	285	248
ส่วนผสมแบบดั้งเดิม	334	353
ผลต่าง	-14%	-30%

ตารางที่ 4.5 ค่าพลังงานกระตุ้นจากการคำนวณและแปลงด้วยวิธี Kissinger

activation energy (kJ/mol)	onset	endothermic peak
ส่วนผสมแบบจัดลำดับ	300	264
ส่วนผสมแบบดั้งเดิม	349	369
ผลต่าง	-14%	-28%



#### 4.3 ทดลองหลอมแบบจัดลำดับการผสมระดับอุตสาหกรรม

ผลเปรียบเทียบการใช้พลังงาน ช่วงการผสมแบบดั้งเดิม และช่วงผสมแบบจัดลำดับ ดังตารางที่ 4.6 เป้าหมายคือลดการใช้พลังงานลงร้อยละ 1 โดยมีปัจจัยควบคุม ได้แก่ อุณหภูมิเตา (Furnace temperature) สัดส่วนการใช้เศษแก้ว (Cullet ratio) กำลังการดึงน้ำแก้ว (Ton pull) การควบคุมการป้อนส่วนผสมเข้าเตา (Batch charger control) เวลาผสม (Mixing time) และความชื้นของส่วนผสม (Moisture of batch)

ตารางที่ 4.6 ข้อมูลการใช้พลังงานเปรียบเทียบระหว่างช่วงที่ผสมแบบดั้งเดิมกับแบบจัดลำดับ

เตาหลอม	การใช้พลังงานเทียบกับการผสมแบบดั้งเดิม					วิธีการวัดผล
	อุณหภูมิเตา	กำลังการผลิตเฉลี่ย	พลังงานรวม	พลังงานเชื้อเพลิง	พลังงานไฟฟ้า	
A	1240-1245	315	-1.8%	-1.2%	-38.3%	กำลังผลิตคงที่
	1244-1246	309	-0.7%	-0.9%	10.0%	สมการเชิงเส้น
B	1295-1297	363	-1.9%	-2.0%	-10.0%	กำลังผลิตคงที่
	1294-1296	360	-0.7%	-1.1%	1.3%	สมการเชิงเส้น
C	1148-1151	380	-0.9%	-1.2%	2.1%	สมการเชิงเส้น
D	1147-1149	366	-0.5%	-0.8%	3.2%	สมการเชิงเส้น
E	1255-1257	298	-0.5%	-1.1%	27.7%	กำลังผลิตคงที่
	1255-1257	300	-0.2%	-0.8%	49.2%	สมการเชิงเส้น

เตาหลอม A มีการทดลอง 2 รอบ เพื่อใช้ยืนยันผลการทดลอง โดยรอบแรกการใช้พลังงานรวมของช่วงการทดลองจัดลำดับการผสมเฉลี่ยใช้ต่ำกว่าร้อยละ 1.8 ส่วนรอบที่สองมีแนวโน้มเหมือนกัน แต่ผลต่างการใช้พลังงานลดลงอยู่ที่ร้อยละ 0.7 ซึ่งเป็นผลจากปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าของช่วงจัดลำดับการผสมใช้สูงกว่าแบบดั้งเดิม นอกจากนี้สิ่งที่แตกต่างกัน คือ กำลังการผลิต การทดลองครั้งที่สอง กำลังการผลิตลดลงจากรอบแรก จาก 315 เหลือ 306 ต้นต่อวัน จากมาตรฐานโดยการคำนวณปริมาณพลังงานอ้างอิงจากการออกแบบเตาหลอม กำลังการผลิตต่ำสุดที่จะเริ่มเปิดใช้พลังงานไฟฟ้า คือประมาณ 320 ต้นต่อวันเมื่ออายุเตายังใหม่

เตาหลอม B การใช้พลังงานรวมของช่วงการทดลองจัดลำดับการผสมใช้ต่ำกว่าร้อยละ 1.9 ใกล้เคียงกับการทดลองที่เตาหลอม A รอบแรก โดยข้อมูลความชื้นเก็บตัวอย่างก่อนเข้าเตาเฉลี่ย เท่ากันที่ร้อยละ 2.9 และรอบที่ 2 มีแนวโน้มเช่นเดียวกัน แต่ผลการประหยัดต่ำลง

เตาหลอม C การใช้พลังงานรวมของช่วงการทดลองจัดลำดับการผสมใช้ต่ำลงร้อยละ 0.9 และเตาหลอม D การใช้พลังงานรวม ต่ำลงร้อยละ 0.5

เตาหลอม E ใช้พลังงานลดลงร้อยละ 0.5 และ 0.2 ต่ำกว่าเป้าหมาย อาจมีสาเหตุจาก ความชื้นของส่วนผสมเฉลี่ยช่วงที่ทำการทดลองจัดลำดับนั้นสูงกว่าที่ร้อยละ 3.5 ขณะที่ช่วงผสมปกติ ร้อยละ 3.2 ที่สัดส่วนการใช้เศษแก้วคงที่ร้อยละ 40 ถือว่าเป็นสัดส่วนที่ต่ำ ดังนั้นความชื้นของ ส่วนผสมจึงส่งผลโดยตรง รวมถึงเวลาในการวัดผลก็น้อยมาก และการผสมแบบจัดลำดับสำหรับ เตา E ลำดับแรกเตาหลอมอื่นผสมเฉพาะทรายและโซดาแอช แต่เนื่องด้วยข้อจำกัดของระบบการผสม จึงจำเป็นต้องผสมแร่หินฟีนมาไปในลำดับแรกด้วย นอกจากนี้จะเห็นว่ามีการใช้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ทั้ง 2 รอบการวัดผล แต่อาจไม่ได้เป็นประเด็น เนื่องจากกำลังการผลิตที่ไม่คงที่ จากการ ออกแบบถูกระบุข้อจำกัดในการเริ่มใช้พลังงานไฟฟ้าในกรณีเดียวกับ A อาจทดลองเพิ่มเติมเมื่อกำลัง การผลิตสูงกว่า 320 ตันต่อวันต่อเนื่อง

เตาหลอม C และ D ควรทดสอบรอบที่ 2 เพื่อยืนยันผลการทดลอง รวมถึงการค้นหาวิธีการ เก็บข้อมูลเพิ่ม ปัจจุบันใช้ข้อมูลจากการจดบันทึกของพนักงานเตาหลอม มาตรฐานการทำงานคือจด บันทึกภายใน 1 ชั่วโมงก่อนหมดเวลาทำงาน ซึ่งอาจมีความคลาดเคลื่อนได้ เนื่องจากเป้าหมายร้อยละ 1 ที่กำหนดถือว่าเป็นค่าที่ต่ำ เมื่อเทียบปริมาณกับการใช้พลังงานทั้งวัน

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

จากข้อสันนิษฐาน การจัดลำดับการผสมโดยการผสมทรายและโซดาแอชเข้าด้วยกันก่อนนั้น หลักการคือให้ความร้อนในทราย ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่ใช้ในการหลอมแก้วจริงมีความร้อนประมาณร้อยละ 4-6 จะช่วยละลายโซเดียมไอออนในโซดาแอช ทำให้พื้นที่ผิวที่อยู่ติดกัน (Contact area) มีเพิ่มขึ้น ซึ่งช่วยให้เร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาในสถานะของแข็ง (Solid-State reaction) รวมถึงโอกาสในการเกิดปฏิกิริยาแรกเริ่ม ปริมาณพลังงานที่ต้องการต่ำลง จากผลการทดลองเมื่อเปลี่ยนแปลงเวลาในการขึ้นอุณหภูมิหลอมวัตถุดิบ แสดงค่าเฉลี่ยของทุกเวลาคงอุณหภูมิ พบว่าส่วนผสมแบบจัดลำดับการผสมสามารถหลอมตัวเร็วกว่าส่วนผสมแบบดั้งเดิมทุกเงื่อนไขการทดสอบหลอม

และจากผลการเปรียบเทียบการใช้พลังงานที่เตาหลอมระดับอุตสาหกรรม พบว่าช่วงที่ผสมแบบจัดลำดับการผสมใช้พลังงานรวมมีแนวโน้มต่ำกว่าการผสมแบบดั้งเดิม สอดคล้องกับผลการทดลองหลอมระดับห้องปฏิบัติการ จากข้อมูลสามารถลดปริมาณการใช้พลังงานรวมได้ในช่วงร้อยละ 0.5 – 2.0 ขึ้นกับเตาหลอม และปัจจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) ทดสอบสมบัติทางความร้อนของทรายเพียงวัตถุดิบเดียว เพื่อเปรียบเทียบความต่างกับการทดลองของทรายจับคู่กับวัตถุดิบอื่น ๆ
- 2) สามารถขยายผลใช้ได้จริงในระดับอุตสาหกรรม จากผลการทดสอบเป็นไปตามสมมติฐาน แต่เนื่องจากปัจจัยควบคุมของทั้ง 5 เตาหลอมที่ทดสอบมีจำนวนมากและมักมีการเปลี่ยนแปลง จึงมีจำนวนข้อมูลน้อยเพื่อเปรียบเทียบนอบ อาจคลาดเคลื่อนได้ ควรเก็บข้อมูลเพิ่มเติม
- 3) การทดลองระดับอุตสาหกรรม อาจทดลองเติมน้ำเพื่อผสมเปียกในขั้นตอนที่หนึ่ง เพื่อเพิ่มการยึดเกาะของทรายกับโซดาแอช

### บรรณานุกรม

1. อธิปไตยพิเศษพงษ์ อ. Chemical & Physical processes in glass melting quality of glass melting process. เอกสารประกอบการสอนวิชา 2300503 กระบวนการในอุตสาหกรรมเบื้องต้น: คณะวิทยาศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 2019.
2. Conradt R. Impact of Raw Material Variation on Furnace Performance and Glass Quality. International commission on glass; Prague 2013.
3. Hrma P. Reaction between Sodium Carbonate and Silica Sand at  $874^{\circ}\text{C} < T < 1022^{\circ}\text{C}$ . Journal of the American Ceramic Society. 1985;68(6):337-41.
4. Verheijen OS, Hubert M. Batch Chemistry and Reactions. In: J. D. Musgraves, J. Hu, Calvez L, editors. Springer Handbook of Glass: Springer International Publishing; 2019. p. 1231-56.
5. Hrma P. Batch melting reactions. In: Paul A, editor. Chemistry of Glasses. 2 ed. New York: Chapman and Hall 1990.
6. Ott WR. Kinetics and mechanism of the reaction between sodium carbonate and silica. Ceramurgia International. 1979;5(1):37-41.
7. Dubois O, Conradt R. Experimental study on the effect of cullet and batch water content on the melting behavior of flint and amber container glass batches. Glass science and technology 2004;77(3):137-48.
8. Conradt R, Suwannathada P, Pimkhaokham P, editors. Local temperature distribution and primary melt formation in a melting batch heap. Glastech Ber; 1994.
9. Fedorov AG, Pilon L. Glass foams: formation, transport properties, and heat, mass, and radiation transfer. Journal of Non-Crystalline Solids. 2002;311(2):154-73.
10. Kim D-S, Dutton BC, Hrma PR, Pilon L. Effect of furnace atmosphere on E-glass foaming. Journal of Non-Crystalline Solids. 2006;352(50):5287-95.
11. Pilon L. Foams in Glass Manufacturing. Foam Engineering. p. 355-409.
12. Pokorny R, Hilliard ZJ, Dixon DR, Schweiger MJ, Guillen DP, Kruger AA, et al. One-Dimensional Cold Cap Model for Melters with Bubblers. J Am Ceram Soc. 2015;98(10):3112-8.
13. Tooley FV. The Handbook of Glass Manufacture. 3 ed. New York: Ashlee

Publishing; 1984.

14. Shelby JE. Introduction to Glass Science and Technology. 2 ed. Cambridge: The Royal Society of Chemistry; 2005.
15. Peterson IM, Shi Y, Ma D, Rygel JL, Wheaton B, Whitfield PS, et al. In situ measurements of reactions in a glass-forming batch by X-ray and neutron diffraction. *J Am Ceram Soc.* 2019;102(3):1495-506.
16. Choudhary MK, Venuturumilli R, Hyre MR. Mathematical Modeling of Flow and Heat Transfer Phenomena in Glass Melting, Delivery, and Forming Processes. *International Journal of Applied Glass Science.* 2010;1(2):188-214.
17. Marcela J, Lubomir N. Role of glass melt flow in container furnace examined by mathematical modelling. *Ceramics-Silikáty.* 2018;62:86-96.
18. Pokorný R, Hрма P, Lee S, Klouzek J, Choudhary MK, Kruger AA. Modeling batch melting: Roles of heat transfer and reaction kinetics. *J Am Ceram Soc.* 2020;103(2):701-18.
19. Ueda N, Vernerová M, Kloužek J, Ferkl P, Hрма P, Yano T, et al. Conversion kinetics of container glass batch melting. *Journal of the American Ceramic Society.* 2020;104(1):34-44.
20. Mase H, Oda K. Mathematical model of glass tank furnace with batch melting process. *Journal of Non-Crystalline Solids.* 1980;38-39:807-12.
21. Xiqi W, Viskanta R. Modeling of heat transfer in the melting of a glass batch. *Journal of Non-Crystalline Solids.* 1986;80(1):613-22.
22. Verheijen OS, Op Den Camp OMGC, Beerkens RGC, editors. Heating of Glass-Forming Batch Blankets. 63rd Conference on Glass Problems: Ceramic Engineering and Science Proceedings; 2008: The American Ceramic Society.
23. Beerkens RGC, Muijsenberg HPH, Heijden vd, T. Modeling of sand grain dissolution in industrial glass melting tanks. *Glass Science and Technology.* 1994;67(7):179-88.
24. Hрма P, Marcial J. Dissolution retardation of solid silica during glass-batch melting. *Journal of Non-Crystalline Solids.* 2011;357(15):2954-9.
25. Hрма P, Marcial J, Swearingen KJ, Henager SH, Schweiger MJ, TeGrotenhuis NE.

Conversion of batch to molten glass, II: Dissolution of quartz particles. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2011;357(3):820-8.

26. Grynberg J, Gouillart E, Chopinet M-H, Toplis MJ. Importance of the Atmosphere on the Mechanisms and Kinetics of Reactions Between Silica and Solid Sodium Carbonate. *International Journal of Applied Glass Science*. 2015;6(4):428-37.

27. Conradt R. The industrial glass-melting process. In: K. H, editor. *The SGTE Casebook Thermodynamics At Work*. 2 ed. Cambridge: Woodhead Publishing; 2008. p. 282-303.

28. Wellen RMR, Canedo EL. On the Kissinger equation and the estimate of activation energies for non-isothermal cold crystallization of PET. *Polymer Testing*. 2014;40:33-8.

29. Vyazovkin S. Kissinger Method in Kinetics of Materials: Things to Beware and Be Aware of. *Molecules*. 2020;25(12).

30. Ozawa T. A New Method of Analyzing Thermogravimetric Data. *Bulletin of the Chemical Society of Japan*. 1965;38:1881-6.

31. Koga N. Ozawa's kinetic method for analyzing thermoanalytical curves. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2013;113(3):1527-41.

32. Hong KS, Speyer RF. Thermal Analysis of Reactions in Soda-Lime Silicate Glass Batches Containing Melting Accelerants: I, One- and Two-Component Systems. *Journal of the American Ceramic Society*. 1993;76(3):598-604.

33. Hong KS, Lee SW, Speyer RF. Thermal Analysis of Reactions in Soda-Lime Silicate Glass Batches Containing Melting Accelerants: II, Multicomponent Systems. *Journal of the American Ceramic Society*. 1993;76(3):605-8.



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ปรีณาพรรณ ปิ่นหอม
วัน เดือน ปี เกิด	22 พฤศจิกายน 2537
สถานที่เกิด	จังหวัดศรีสะเกษ ประเทศไทย
วุฒิการศึกษา	วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ที่อยู่ปัจจุบัน	บ้านเลขที่ 303/16 หมู่ 7 ตำบลยางชุมน้อย อำเภอยางชุมน้อย จังหวัดศรีสะเกษ 33190
ผลงานตีพิมพ์	Preenapun Pinhorn, Apirat Theerapapvisetpong, Sirithan Jiemsirilert. Improving rate of batch-to-melt conversion in soda-lime glass by adjusting batch mixing sequence. Proceedings of the The 5th International Conference on Smart Materials and Nanotechnology. 2020: 147-152.