

การใช้แร่ควอตซ์แทนทรายในแก้วโซดาไลม์



นายภาสกร คงชม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีเซรามิก ภาควิชาวัสดุศาสตร์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2557

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

QUARTZ REPLACEMENT OF SILICA SAND IN SODA LIME GLASSES

Mr. Patsakorn Kongchom



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Ceramic Technology

Department of Materials Science

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2014

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การใช้แร่ควอตซ์แทนทรายในแก้วโซดาไลม์
โดย	นายภาสกร คงชม
สาขาวิชา	เทคโนโลยีเซรามิก
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริธันว์ เจียมศิริเลิศ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ดร.กนิษฐ์ ตะปะสา

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ หารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดุจฤทัย พงษ์เก่า คະซีมา)
.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริธันว์ เจียมศิริเลิศ)
.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ดร.กนิษฐ์ ตะปะสา)

.....กรรมการ
(อาจารย์ ดร.อภิรัฐ อธิภาวิเศษพงษ์)
.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.เทพีวรรณ จิตรวัชรโกมล)

ภาสกร คงชม : การใช้แร่ควอตซ์แทนทรายในแก้วโซดาไลม์ (QUARTZ REPLACEMENT OF SILICA SAND IN SODA LIME GLASSES) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร. ศิริธันว์ เจียมศิริเลิศ, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ดร.กนิษฐ์ ตะปะสา, 92 หน้า.

งานวิจัยนี้ได้นำแร่ควอตซ์มาเป็นส่วนผสมในการผลิตแก้วแทนที่ทรายเพื่อลดต้นทุนการผลิต เนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีใกล้เคียงกัน โดยศึกษาอนุภาคและวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสของ ทรายแก้วขนาดเล็กเปรียบเทียบกับแร่ควอตซ์ขนาดเล็ก กลาง และใหญ่ที่มีผลต่อการหลอมที่อุณหภูมิ 1200 - 1400 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ขึ้นงานแก้วโซดาไลม์จากทรายและแร่ควอตซ์หลอมที่อุณหภูมิ 1450 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง นำมาวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี สีแก้ว สัมประสิทธิ์การขยายตัวทาง ความร้อน และความหนืด จากการทดลองพบว่าแก้วทั้งสอง มีค่าใกล้เคียงกัน โดยค่าสีของแก้วจากแร่ ควอตซ์ในระบบ CIE L* a* b มีค่า L*= 61.04 a*= -33.73 b*= 78.93 และค่าสัมประสิทธิ์การ ขยายตัวทางความร้อน $8.69 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ค่าความหนืดที่อุณหภูมิจุดความเครียด อุณหภูมิอบอ่อน อุณหภูมิจุดอ่อนตัว อุณหภูมิสำหรับการขึ้นรูป อุณหภูมิหยดน้ำแก้วและจุดหลอมเหลวเป็น 544.9 575 647.3 1059.3 1215.7 และ 1445.8 °C ตามลำดับ นอกจากนี้ผลการทดสอบการหลอม ตัวของวัตถุดิบแก้วด้วยวิธี Batch-Free-Time ที่อุณหภูมิ 1400 °C เป็นเวลา 80 - 100 นาที พบว่า แก้วทั้งสองเกิดการหลอมตัวหมดที่เวลา 100 นาทีและเมื่อคำนวณพลังงานการหลอมด้วยเทอร์โม ไดนามิกส์ของแก้วที่ได้จากแร่ควอตซ์มีค่า Exploited heat (Hex) 601.03 kWh/t ซึ่งใกล้เคียงกับ ของทราย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาควิชา วัสดุศาสตร์

สาขาวิชา เทคโนโลยีเซรามิก

ปีการศึกษา 2557

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

5572075823 : MAJOR CERAMIC TECHNOLOGY

KEYWORDS: QUARTZ / SODA-LIME GLASS / BATCH-FREE-TIME

PATSAKORN KONGCHOM: QUARTZ REPLACEMENT OF SILICA SAND IN SODA LIME GLASSES. ADVISOR: ASST. PROF. SIRITHAN JIEMSIRILERS, Ph.D., CO-ADVISOR: KANIT TAPASA, Ph.D., 92 pp.

In this study, quartz was used to be mixture in glass production instead of silica sand to reduce cost. The particle size and phase composition of small silica sand was analyzed to compare with small, medium and large quartz that effect to melting temperature at 1200-1400 °C for 1 hr. The chemical composition, color, thermal expansion coefficient and viscosity of soda-lime glass sample that made from silica sand and quartz at melting temperature 1450 °C for 3 hrs. was analyzed. The results indicated that both of glass is similarity. The CIE L*a*b color system of quartz glass has given $L^* = 61.04$ $a^* = -33.73$ $b^* = 78.93$. The thermal expansion coefficient is $8.69 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. The viscosity at strain point, annealing point, softening point, working point, gob temperature and melting temperature is 544.9, 575, 647.3, 1059.3, 1215.7 and 1445.8 °C, respectively. The result from Batch-free-time testing at temperature 1400 °C for 80-100 minute and phase composition analysis indicated that quartz and sand glass were completely melted at 100 minute. The calculated energy for melting by using thermodynamic of glass which made from quartz is Exploited heat (Hex) 601.03 kWh/t, which is similar with sand.

Department: Materials Science

Student's Signature

Field of Study: Ceramic Technology

Advisor's Signature

Academic Year: 2014

Co-Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

สำหรับงานวิจัยและการเขียนเล่มวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ได้รับความเมตตากรุณาจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริธันว์ เจียมศิริเลิศ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ดร.กนิษฐ์ ตะปะสา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้คำปรึกษา แนะนำ อบรม สั่งสอน ตลอดระยะเวลาในการทำวิจัย

ขอขอบพระคุณ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และคณาจารย์ทุกท่าน สำหรับการตรวจแก้ไขข้อบกพร่องของรูปเล่มวิทยานิพนธ์และคำแนะนำต่างๆ ทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้ถูกต้องและสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการศูนย์เชี่ยวชาญด้านแก้ว กรมวิทยาศาสตร์บริการ ที่ให้ความช่วยเหลือเป็นอย่างดีในการวิเคราะห์ทดสอบ

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการสำนักเทคโนโลยีชุมชน กลุ่มวิจัยและพัฒนาการผลิตเซรามิก กรมวิทยาศาสตร์บริการ ที่ให้ความช่วยเหลือเป็นอย่างดีในการวิเคราะห์ทดสอบ

ขอขอบคุณ บริษัท บางกอกกล๊าส จำกัด ที่เอื้อเฟื้อวัสดุดิบในการทำวิจัย

ขอขอบคุณ บริษัท เอส.เอ.พี. เหมืองแร่ จำกัด ที่เอื้อเฟื้อแร่ควอตซ์ในการทำวิจัย

ขอขอบคุณ พี่ น้อง และเพื่อน ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่าน ที่คอยเป็นกำลังใจ ให้คำปรึกษา และช่วยเหลือมาโดยตลอด

สุดท้ายขอขอบพระคุณครอบครัวผู้วิจัย ที่คอยให้การสนับสนุน และเป็นกำลังใจมาโดยตลอด

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูป.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 แก้วและนิยามของแก้ว.....	3
2.2 ชนิดของแก้ว.....	5
2.3 วัตถุดิบและบทบาทของวัตถุดิบ	9
2.3.1 วัตถุดิบ	9
2.3.2 บทบาทของวัตถุดิบ	12
2.4 การผลิตบรรจุภัณฑ์แก้ว.....	14
2.4.1 การเตรียมวัตถุดิบ.....	14
2.4.2 การหลอม.....	14
2.4.3 การขึ้นรูป	16
2.4.4 การอบอ่อน	17

3.3.4.1 การเตรียมทดสอบด้วยวิธี Batch-Free Time	38
3.3.4.2 วิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสของวัสดุที่หลอมตัวไม่หมด	39
3.3.5 การคำนวณค่าพลังงานทางเทอร์โมไดนามิกส์	39
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล	40
4.1 ผลการวิเคราะห์วัสดุของทรายและควอตซ์ในเบื้องต้น	40
4.1.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของทรายและควอตซ์ด้วย X-ray fluorescence	40
4.1.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสของทรายและควอตซ์ด้วย X-ray Diffractrometer	41
4.1.3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุที่ใช้ในการทดลองด้วย X-ray fluorescence	42
4.2 การวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของแร่ควอตซ์ที่ส่งผลต่อการหลอม	45
4.2.1 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนด้วย DSC/TGA.....	45
4.4.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของเฟสด้วย X-ray Diffractometre	48
4.3 ผลการวิเคราะห์สมบัติของแก้วโซดาไลม์สีเขียวที่ใช้แร่ควอตซ์เปรียบเทียบกับแก้วโซดา ไลม์สีเขียวที่ใช้ทรายแก้ว.....	52
4.3.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของแก้วโซดาไลม์สีเขียวที่ได้จากการทดลอง ด้วย X-ray fluorescence	52
4.3.2 ผลการวิเคราะห์ค่าสีในระบบ CIE L*a*b.....	53
4.3.4 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง Fiber elongation.....	55
4.4 ผลการวิเคราะห์ Batch-Free-Time	57
4.4.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของวัสดุบนผิวหน้าด้วย X-ray Diffractometre....	59
4.5 การทดลองคำนวณพลังงานทางเทอร์โมไดนามิกส์.....	60
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ	61

5.1 สรุปผลการวิจัย.....	61
5.2 ข้อเสนอแนะ	62
รายการอ้างอิง	63
ภาคผนวก.....	69
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	92



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 สมบัติของแก้วโซดาไลม์.....	5
ตารางที่ 2.2 สมบัติของแก้วบอโรซิลิเกต	6
ตารางที่ 2.3 ความถ่วงจำเพาะของโครงสร้างซิลิกา	9
ตารางที่ 2.4 ค่าความร้อนมาตรฐาน (H°) ของวัตถุดิบแก้วและแก๊สในวัตถุดิบแก้ว	22
ตารางที่ 2.5 สมบัติเทอร์โมไดนามิกส์ของเฟสในแก้วประกอบด้วยเอนทัลปี (H, kJ/mol) เอนโทรปี (S) และค่าความจุความร้อน (J/(mol·k)).....	23
ตารางที่ 2.7 องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบในการหลอมแก้ว.....	28
ตารางที่ 2.8 สัมประสิทธิ์การขยายตัวของแก้วสูตรที่ 1(Glass A) สูตรที่ 2 (Glass B).....	29
ตารางที่ 3.1 ปริมาณวัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง	33
ตารางที่ 3.2 ปริมาณวัตถุดิบที่ใช้ในการทดลองแก้วโซดาไลม์สีเขียว	35
ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของทรายและควอตซ์.....	40
ตารางที่ 4.2 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง	42
ตารางที่ 4.3 องค์ประกอบทางเคมีของขวดแก้วโซดาไลม์สีเขียว แก้วที่ใช้ทรายและควอตซ์.....	52
ตารางที่ 4.4 ค่าสีในระบบ CIE L^*a^*b	54
ตารางที่ 4.5 ผลจากการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง Dilatometer.....	54
ตารางที่ 4.6 ผลจากการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง Fiber elongation.....	56
ตารางที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์ Batch-Free-Time.....	58
ตารางที่ 4.8 คำนวณพลังงานด้วยเทอร์โมไดนามิกส์.....	60

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 ประเภทของวัสดุ	4
รูปที่ 2.2 โครงสร้างของแก้ว	4
รูปที่ 2.3 โครงสร้างของวัสดุที่มีผลึก	4
รูปที่ 2.4 แก้วโซดาไลม์	5
รูปที่ 2.5 แก้วบอโรซิลิเกต	6
รูปที่ 2.6 แก้วคริสตัล	7
รูปที่ 2.7 แก้วโอปอล	7
รูปที่ 2.8 แก้วอะลูมิโนซิลิเกต	8
รูปที่ 2.9 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของซิลิกา	9
รูปที่ 2.10 โครงสร้างของซิลิกา	10
รูปที่ 2.11 การบวนการขึ้นรูปขวดแบบ Blow and Blow process	16
รูปที่ 2.12 การบวนการขึ้นรูปขวดแบบ Press and Blow process	17
รูปที่ 2.13 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าช่วงที่ตามองเห็น	18
รูปที่ 2.14 Chromaticity diagram	19
รูปที่ 2.15 Color space diagram	19
รูปที่ 2.16 อัตราส่วนการหลอมของควอตซ์ที่ขนาดอนุภาคต่างกัน	26
รูปที่ 2.17 การหลอมของแก้วที่มีองค์ประกอบของทรายและควอตซ์ที่อุณหภูมิ 900-1200 °C	26
รูปที่ 2.18 อัตราส่วนที่ไม่ละลายของควอตซ์ที่ขนาดอนุภาคต่างกัน	27
รูปที่ 2.19 การละลายของควอตซ์ที่ขนาดอนุภาคต่างกัน	27
รูปที่ 2.20 อัตราส่วนที่ไม่ละลายของควอตซ์ที่อัตราการให้ความร้อนต่างกัน	28

รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการหลอมแก้วในการทดลองที่ 3.3.2.....	34
รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการหลอมแก้วในการทดลองที่ 3.3.3.....	36
รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการทดลองการหลอมตัวของวัตถุดิบแก้วด้วยวิธี Batch-Free Time ในการทดลองที่ 3.3.4.....	38
รูปที่ 4.1 องค์ประกอบทางเฟสของทราย	41
รูปที่ 4.2 องค์ประกอบทางเฟสของควอตซ์.....	41
รูปที่ 4.3 กราฟ DSC ของซิลิกากับหินปูน (ทรายเส้นสีเขียวและควอตซ์เส้นสีแดง).....	46
รูปที่ 4.4 กราฟ TGA ของซิลิกากับหินปูน (ทรายเส้นสีเขียวและควอตซ์เส้นสีแดง)	46
รูปที่ 4.5 กราฟ DSC ของซิลิกากับโซดาแอช (ทรายเส้นสีเขียวและควอตซ์เส้นสีแดง).....	47
รูปที่ 4.6 กราฟ TGA ของซิลิกากับโซดาแอช (ทรายเส้นสีเขียวและควอตซ์เส้นสีแดง).....	47
รูปที่ 4.7 องค์ประกอบทางเฟสของแก้วที่ใช้อนุภาคควอตซ์ขนาดใหญ่หลอมที่อุณหภูมิ 1200-1400 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง.....	48
รูปที่ 4.8 องค์ประกอบทางเฟสของแก้วที่ใช้อนุภาคควอตซ์ขนาดกลางหลอมที่อุณหภูมิ 1200-1400 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง.....	49
รูปที่ 4.9 องค์ประกอบทางเฟสของแก้วที่ใช้อนุภาคควอตซ์ขนาดเล็กหลอมที่อุณหภูมิ 1200-1400 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง.....	50
รูปที่ 4.10 องค์ประกอบทางเฟสของแก้วที่ใช้ทรายที่ขนาดเล็กหลอมที่อุณหภูมิ 1200-1400 °C	51
รูปที่ 4.11 ผลการวิเคราะห์ค่าสีในระบบ CIE L*a*b ด้วยเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer...	53
รูปที่ 4.12 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง Dilatometer	55
รูปที่ 4.13 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง Fiber elongation	56
รูปที่ 4.14 องค์ประกอบทางเฟสของแก้วที่ใช้ทรายที่หลอมที่เวลาต่างกัน.....	59
รูปที่ 4.15 องค์ประกอบทางเฟสของแก้วที่ใช้ควอตซ์ที่หลอมที่เวลาต่างกัน	60

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

อุตสาหกรรมแก้วและกระจกเป็นอุตสาหกรรมหนักที่ใช้พลังงานในการผลิตสูงและกระบวนการผลิตที่ต่อเนื่อง ปัจจุบันกลุ่มอุตสาหกรรมแก้วและกระจกกำลังประสบปัญหาหลายด้าน เช่น ปัญหาด้านการขาดแคลนทรายในประเทศ ปัญหาด้านต้นทุนค่าเชื้อเพลิงจากการปรับราคาแก๊สหุงต้ม (แอลพีจี)^[1,2] และปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมโดยกระทรวงอุตสาหกรรมมีมาตรการบังคับให้ลดปริมาณมลพิษ ตามกฎหมายของกระทรวงอุตสาหกรรม^[3] อุตสาหกรรมแก้วและกระจกจึงต้องเตรียมความพร้อมในการรับมือกับปัญหาต่าง ๆ เหล่านี้

สำหรับปัญหาเร่งด่วนคือการหาแหล่งทรายแก้วเนื่องจากทรายแก้วเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตกระจกและผลิตภัณฑ์แก้ว ซึ่งเป็นอุตสาหกรรมที่มีมูลค่าสูงและสำคัญยิ่งต่อการพัฒนาประเทศมาตั้งแต่อดีต ปัจจุบันแหล่งแร่ทรายแก้วในประเทศไทยมีปริมาณลดลงและมีการนำเข้าแร่ทรายแก้วคุณภาพสูงจากประเทศออสเตรเลีย อินโดนีเซีย สาธารณรัฐประชาชนจีน สหรัฐอเมริกา และญี่ปุ่น ปีละ 33,000 เมตริกตัน^[4] การหาแหล่งแร่ทดแทนชนิดอื่นๆ ภายในประเทศมาใช้ทดแทนจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการลดต้นทุนการผลิต แร่ควอตซ์เป็นแร่ที่พบอยู่ทั่วไปตามแหล่งแร่ต่างๆ ในประเทศ เช่น เหมืองแร่พลอย ดินขาว เฟลด์สปาร์ เป็นต้น แร่ควอตซ์ที่พบในประเทศมีองค์ประกอบทางเคมีหลัก เช่นเดียวกับทรายแก้วคือมี ซิลิกา แต่มีราคาสูงกว่าทรายแก้วคุณภาพสูงที่นำเข้า อย่างไรก็ตาม สารเจือปนที่พบในแร่ควอตซ์ทั่วไปมักมีปริมาณเหล็กออกไซด์ค่อนข้างสูง ทำให้แก้วมีสีเขียวเกิดขึ้น^[5,6,7,8,9] หากเลือกนำมาใช้ผลิตแก้วโซดาโลม์จึงน่าจะเหมาะกับการผลิตแก้วโซดาโลม์สีมากกว่าผลิตแก้วโซดาโลม์ใส

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการใช้แร่ควอตซ์แทนทรายแก้วโดยศึกษาขนาดอนุภาคของแร่ควอตซ์ที่ส่งผลต่อการหลอมและศึกษาสมบัติของแก้วโซดาโลม์สีเขียวที่หลอมได้จากแร่ควอตซ์เปรียบเทียบกับแก้วโซดาโลม์สีเขียวที่หลอมได้จากทรายแก้ว ในส่วนของการใช้แร่ควอตซ์แทนทรายแก้ว โดยการศึกษาอนุภาคของแร่ควอตซ์ที่ส่งผลต่อการหลอม จะวิเคราะห์ความเป็นผลึกของแก้วโซดาโลม์ และในส่วนของการศึกษาคุณสมบัติของแก้วโซดาโลม์สีเขียวที่ใช้แร่ควอตซ์เปรียบเทียบกับแก้วโซดาโลม์ที่ใช้ทรายแก้ว จะพิจารณาเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน วิเคราะห์สีชิ้นงานแก้ว วิเคราะห์ความหนืดของแก้วและวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีในชิ้นงานแก้ว อีกทั้งยังมีการคำนวณค่าพลังงานทางเทอร์โมไดนามิกส์และทดสอบการหลอมตัวของวัตถุดิบแก้ว

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

ศึกษาอิทธิพลของแร่ควอตซ์ต่อการหลอมและศึกษาสมบัติของแก้วโซดาไลม์สีเขียว

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาและค้นคว้าเอกสารข้อมูลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. ศึกษาวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ การเปลี่ยนแปลงความร้อนและคำนวณน้ำหนักวัตถุดิบจากโปรแกรม Glass cal
3. ศึกษาขนาดอนุภาคของแร่ควอตซ์ที่ส่งผลต่อการหลอม
4. ศึกษาสมบัติของแก้วโซดาไลม์ที่ใช้แร่ควอตซ์เปรียบเทียบกับแก้วโซดาไลม์ที่ใช้ทรายแก้ว คำนวณค่าพลังงานทางเทอร์โมไดนามิกส์และทดสอบการหลอมตัวของวัตถุดิบแก้วด้วยวิธี Batch-Free Time

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้แก้วโซดาไลม์สีเขียวที่ผลิตโดยใช้แร่ควอตซ์แทนทรายแก้วที่มีต้นทุนการผลิตต่ำกว่า

บทที่ 2

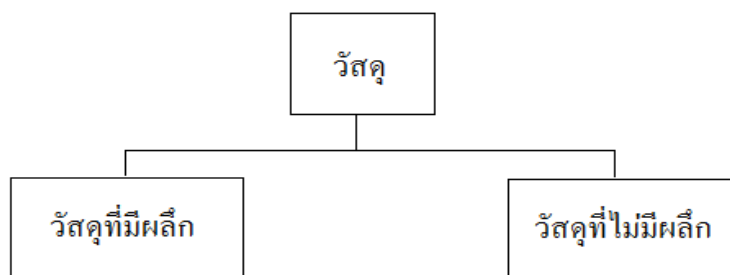
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปัจจุบันแก้วมีความสำคัญกับชีวิตประจำวันอย่างมาก แก้วถูกนำมาใช้อย่างหลากหลายไม่ว่าจะเป็นในภาคอุตสาหกรรมหรือทางการแพทย์^[10] เพราะแก้วมีคุณสมบัติที่ดีหลายประการเช่น โปร่งใส ทนต่อกรดเบส ใส น้ำ แข็งแรงและทนต่อแรงดัน แก้วที่พบเห็นได้มากที่สุดคือแก้วโซดาไลม์ เช่น ขวด แก้วน้ำ ซึ่งมีองค์ประกอบหลักคือ ททราย โซดาแอช และ หินปูน ซึ่งสามารถพบเห็นแก้วชนิดนี้ได้ร้อยละ 65 ของแก้วทั้งหมด ทั้งนี้แก้วชนิดนี้เป็นที่นิยมเพราะมีราคาถูก นอกจากนี้แก้วสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้โดยเศษแก้วสามารถนำมาหลอมใหม่ได้ ในภาคอุตสาหกรรมใช้เศษแก้วในการหลอมร้อยละ 40-70 เพื่อลดต้นทุนการผลิต ในปัจจุบันมีงานวิจัยมากมายในการใช้วัสดุชนิดอื่นทดแทนสูตรเดิมเพื่อลดต้นทุนการผลิต อีกทั้งมีการเติมสารเคมีบางตัวเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติบางประการของแก้ว

2.1 แก้วและนิยามของแก้ว

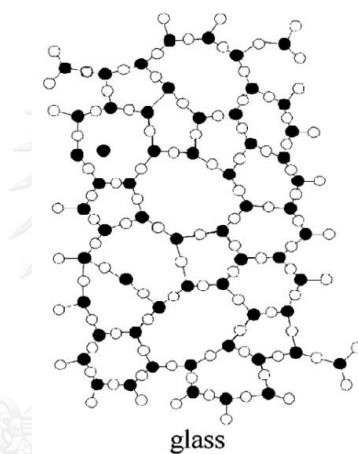
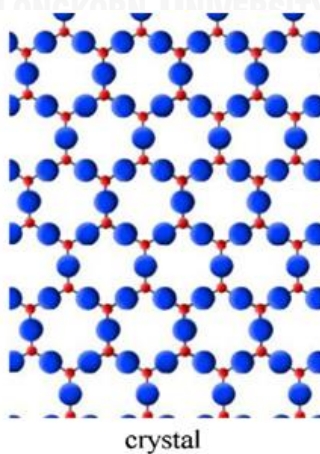
แก้วเป็นวัสดุที่มีประวัติการค้นพบมากกว่า 5000 ปีก่อน คริสต์ศักราช โดยชาว phoenician ได้ก่อไฟที่ชายทะเล โดยใช้เนตรอน (คาร์บอนเนตของโซดา) แทนเตาผิงที่ตั้งอยู่บนไฟ ทำให้ก้อนเนตรอนหลอมละลายรวมกับทรายข้างล่างจนหลอมและเกิดเป็นแก้วขึ้น^[11] จากนั้นแก้วถูกนำมาใช้เป็น อาวุธ เครื่องประดับ เรือรบมาจนในปัจจุบันแก้วถูกใช้อย่างหลากหลายเช่น กระจก บรรจุภัณฑ์ อีกทั้งในปัจจุบันมีการพัฒนา ศึกษา ค้นคว้า จนนำแก้วมาใช้งานอย่างหลากหลาย ในปีคริสตศักราช 1949 American Society for Testing and Materials (ASTM) ได้ให้คำนิยาม ความหมายของแก้ว คือ “ Glass is an inorganic product of fusion which has cooled to a rigid condition without crystallization ” กล่าวคือ แก้วเป็นวัสดุอนินทรีย์ที่ถูกหลอมให้เป็นน้ำ แก้วจากนั้นถูกขึ้นรูปและทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วจนโครงสร้างแก้วไม่มีเวลาเพียงพอที่จะเรียงตัวให้เป็นระเบียบ

โดยทั่วไปวัสดุสามารถแบ่งได้ออกเป็น 2 กลุ่มหลักคือ วัสดุที่มีผลึก (Crystalline materials) และ วัสดุที่ไม่มีผลึก (Non Crystalline materials) โดยที่แก้วจะอยู่ในประเภทของวัสดุที่ไม่มีผลึก



รูปที่ 2.1 ประเภทของวัสดุ

แก้วถูกจัดเป็นวัสดุที่ไม่มีผลึกมีโครงสร้างการจัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ ซึ่งแตกต่างจากวัสดุที่มีผลึกคือวัสดุที่มีผลึกจะมีการจัดเรียงโครงสร้างที่เป็นระเบียบ มีรูปแบบที่แน่นอน

รูปที่ 2.2 โครงสร้างของแก้ว^[12]รูปที่ 2.3 โครงสร้างของวัสดุที่มีผลึก^[13]

2.2 ชนิดของแก้ว^[14]

แก้วโซดาไลม์ (Soda-lime glass)

แก้วโซดาไลม์ผลิตจากวัตถุดิบหลัก คือ SiO_2 ร้อยละ 70-74 โดยน้ำหนัก Na_2O ร้อยละ 13-16 โดยน้ำหนัก และ CaO ร้อยละ 6-10 โดยน้ำหนัก^[15,16,17,18,19] แก้วชนิดนี้เป็นแก้วที่พบเห็นได้โดยทั่วไป ได้แก่แก้วที่เป็นขวด แก้วน้ำ กระจก หลอดไฟ สามารถทำให้เกิดสีต่างๆ ได้โดยการเติมออกไซด์ที่มีสีลงไป แก้วชนิดนี้ทนต่อสารเคมีและต้านทานกระแสไฟฟ้า โดยมีสมบัติดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สมบัติของแก้วโซดาไลม์^[20]

สมบัติ	
Coefficient of Thermal Expansion	$89 \times 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{K}$
Strain point	511 $^\circ\text{C}$
Anneal point	545 $^\circ\text{C}$
Softening point	724 $^\circ\text{C}$
Density	2.40 g/cm^3



รูปที่ 2.4 แก้วโซดาไลม์^[21]

แก้วบอโรซิลิเกต (Borosilicate glass)

แก้วบอโรซิลิเกต เป็นแก้วที่มีโบรอนออกไซด์เป็นองค์ประกอบ โดยทั่วไปแก้วชนิดนี้ประกอบด้วย SiO_2 ร้อยละ 60-80 โดยน้ำหนัก B_2O_3 ร้อยละ 10-20 โดยน้ำหนัก Al_2O_3 ร้อยละ 2-5 โดยน้ำหนัก Na_2O ร้อยละ 5-15 โดยน้ำหนัก^[22,23,24] แก้วชนิดนี้มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ ทนอุณหภูมิสูงได้^[25] ทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ทนการกัดกร่อนของสารเคมี แก้วชนิดนี้สามารถนำไปใช้ทำเครื่องแก้ววิทยาศาสตร์ ทำภาชนะแก้วในครัวเรือน สมบัติของแก้วบอโรซิลิเกตแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สมบัติของแก้วบอโรซิลิเกต^[20]

สมบัติ	
Coefficient of Thermal Expansion	$32.5 \times 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{K}^{-1}$
Strain point	510 °C
Anneal point	560 °C
Softening point	821 °C
Density	2.23 g/cm ³
Young modulus	$6.4 \times 10^3 \text{ Kg/mm}^2$
Refract index	1.474
Max. Thermal shock	160 °C



รูปที่ 2.5 แก้วบอโรซิลิเกต^[26]

แก้วคริสตัล (Lead glass)

แก้วคริสตัลเป็นแก้วที่มีส่วนผสมของตะกั่วออกไซด์ โดยทั่วไปแก้วชนิดนี้ประกอบด้วย SiO_2 ร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก PbO ร้อยละ 15-30 โดยน้ำหนัก Na_2O หรือ K_2O ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก แก้วชนิดนี้มีดัชนีหักเหสูงกว่าแก้วชนิดอื่น ทำให้มีประกายแวววาว มีราคาแพง ด้านทานกระแสไฟฟ้าสูง เหมาะสำหรับทำเครื่องประดับ



รูปที่ 2.6 แก้วคริสตัล^[27]

แก้วโอปอล (Opal glass)

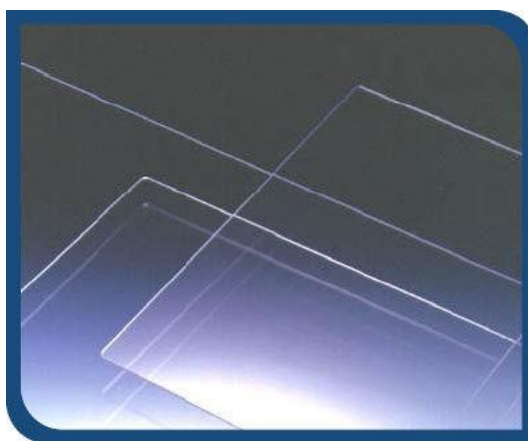
แก้วโอปอลเป็นแก้วที่มีการเติมสารบางชนิด เช่น โซเดียมฟลูออไรด์ (NaF) หรือแคลเซียมฟลูออไรด์ (CaF_2) เพื่อให้มีการตกผลึกหรือการแยกชั้นในเนื้อแก้ว ทำให้แก้วชนิดนี้มีความขุ่นหรือโปร่งแสง มีความทนต่อกรด-เบสและความแข็งแรงปานกลาง เหมาะสำหรับใช้เป็นภาชนะบนโต๊ะอาหาร



รูปที่ 2.7 แก้วโอปอล^[28]

แก้วอะลูมิโนซิลิเกต (Alumino silicate glass)

แก้วอะลูมิโนซิลิเกตเป็นแก้วที่มีอะลูมินาและซิลิกาเป็นส่วนผสมหลัก โดยทั่วไปแก้วชนิดนี้ประกอบด้วย SiO_2 ร้อยละ 55-60 โดยน้ำหนัก Al_2O_3 ร้อยละ 16 โดยน้ำหนัก BaO ร้อยละ 5-10 โดยน้ำหนัก CaO ร้อยละ 8-10 โดยน้ำหนัก MgO ร้อยละ 5-10 โดยน้ำหนัก^[29] มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ ทนทานสภาวะการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลัน ทนทานต่ออุณหภูมิสูง ด้านทานกระแสไฟฟ้าสูง ทนการกัดกร่อน เหมาะสำหรับใช้งานแก้วชนิดนี้ที่อุณหภูมิสูง



รูปที่ 2.8 แก้วอะลูมิโนซิลิเกต^[30]

แก้วอัลคาไลน์-เอิร์ท อะลูมิโนซิลิเกต (alkaline-earth alumino silicate glass)

แก้วอัลคาไลน์-เอิร์ท อะลูมิโนซิลิเกตโดยทั่วไปแก้วชนิดนี้ประกอบด้วย SiO_2 ร้อยละ 50-60 โดยน้ำหนัก Al_2O_3 ร้อยละ 14-25 โดยน้ำหนัก B_2O_3 ร้อยละ 0-10 โดยน้ำหนัก CaO หรือ MgO ร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก Na_2O หรือ K_2O ร้อยละ 1-2 โดยน้ำหนัก มีค่าดัชนีหักเหใกล้เคียงกับ แก้วตะกั่ว และมีความทนทานต่อกรดและด่าง มากกว่าแก้วตะกั่วเล็กน้อย

2.3 วัสดุติบและบทบาทของวัสดุติบ

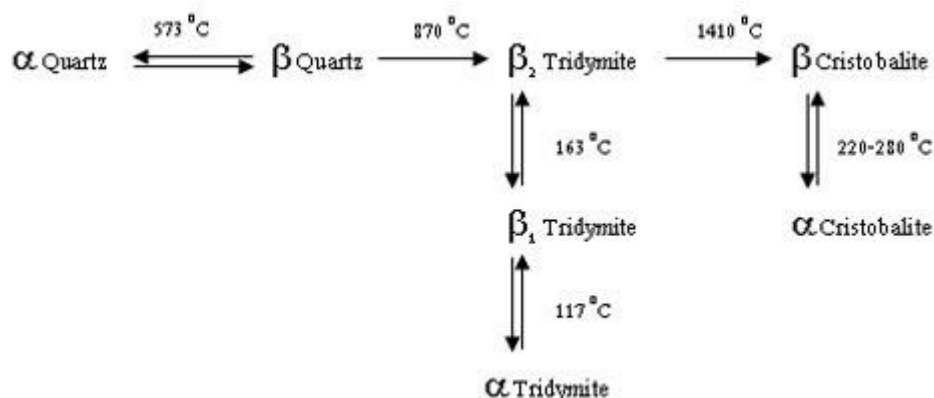
2.3.1 วัสดุติบ

ซิลิกา (SiO₂)

ซิลิกา เป็นส่วนผสมที่สำคัญที่สุดในสูตรแก้ว ทำหน้าที่เป็นโครงสร้างหลักในเนื้อแก้ว ทั้งนี้ที่ความดันบรรยากาศปกติ ซิลิกามีเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายใต้อุณหภูมิต่างๆ อยู่ 3 แบบ ได้แก่ ควอตซ์ (Quartz) ทริดีไมต์ (Tridymite) และคริสโตแบไลต์ (Cristobalite) ซึ่งทั้ง 3 แบบมีสูตรทางเคมีเป็นสูตรเดียวกันคือ SiO₂ แต่จะแตกต่างกันในตำแหน่งการจัดเรียงอะตอมของซิลิกอนและออกซิเจนที่อยู่ในโครงสร้าง ทำให้ความถ่วงจำเพาะต่างกันนอกจากนี้ซิลิกาแต่ละแบบจะมี 2 รูปคือแบบอุณหภูมิสูง หรือ เบต้า (Beta) และแบบอุณหภูมิต่ำ หรืออัลฟา (Alpha) ในโครงสร้างของซิลิกาควอตซ์จะมีความเสถียรจนถึงอุณหภูมิ 870 °C ทริดีไมต์มีความเสถียรอยู่ในช่วง 870 °C ถึง 1470 °C และคริสโตแบไลต์มีความเสถียรอยู่ในช่วง 1470 °C ถึงจุดหลอมตัวที่ 1710 °C แหล่งที่มาของซิลิกาในวัสดุติบหลอมแก้วได้มาจากทรายแก้วหรือควอตซ์

ตารางที่ 2.3 ความถ่วงจำเพาะของโครงสร้างซิลิกา^[31]

โครงสร้างของซิลิกา	ความถ่วงจำเพาะ
ควอตซ์	2.65
ทริดีไมต์	2.28
คริสโตแบไลต์	2.32



รูปที่ 2.9 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของซิลิกา^[31]



รูปที่ 2.10 โครงสร้างของซิลิกา^[32]

ทรายแก้ว

ทรายแก้วมีส่วนประกอบของซิลิการ้อยละ 95-99 โดยน้ำหนัก อาจมีสิ่งเจือปนอื่นๆ ทรายแก้วที่ใช้ในการผลิตแก้วควรมีเหล็กน้อยกว่าร้อยละ 0.025 โดยน้ำหนัก^[14] ทรายแก้วเกิดขึ้นได้โดยทั่วไปในธรรมชาติ เกิดขึ้นโดยกระบวนการทางเคมีและฟิสิกส์ แหล่งแร่ทรายอาจเกิดจากการไหลของน้ำ อุณหภูมิ กระแสลม การผุกร่อนของหิน^[33] แหล่งทรายแก้วในประเทศไทยพบทั้งภาคตะวันออกและภาคใต้ ภาคตะวันออกพบได้ที่ จังหวัดระยอง จันทบุรีและตราด ภาคใต้พบได้ที่จังหวัดชุมพร ภูเก็ต ตรัง นครศรีธรรมราช ปัตตานี และสงขลา^[34] ปัจจุบันทรายแก้วในประเทศไทยเริ่มขาดแคลนจึงมีการนำเข้าทรายแก้วจากต่างประเทศซึ่งมีราคาสูงกว่าทรายในประเทศ โดยทรายที่นำเข้าจากต่างประเทศราคาจะอยู่ที่ประมาณ 1800 บาทต่อตัน

ควอตซ์

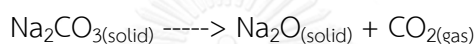
ควอตซ์มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบทางเคมีหลัก มีความแข็งในระดับ 7 ในสเกลความแข็งของโมห์ อาจจะมีสีขาวหรือไม่มีสี ถ้ามีสิ่งเจือปนอยู่จะให้สีต่าง ๆ ควอตซ์มีแหล่งที่มาจากหินอัคนีชนิดที่มีซิลิกามาก ๆ เช่น หินแกรนิต ไรโอไลต์ เมื่อหินอัคนีแตกหักผุพังลง แร่นี้จะสะสมตัวกันเป็นหินชั้น ซึ่งได้แก่หินทราย และก็อาจพบได้ในหินแปรจำพวกไนส์และชีสต์ โดยทั่วไปจะพบควอตซ์เกิดอยู่ร่วมกับเฟลด์สปาร์ในสายแร่ อาจพบควอตซ์เกิดอยู่ตามชายท้องน้ำลำธารและตามฝั่งทะเลในรูปของทราย แหล่งควอตซ์ในประเทศไทยพบได้ในหลายจังหวัดได้แก่จังหวัดลำปาง น่าน อุตรดิตถ์ พิษณุโลก ตาก นครสวรรค์ ราชบุรี เพชรบุรี ประจวบคีรีขันธ์ พังงา ภูเก็ตและนครศรีธรรมราช^[35] ปัจจุบันราคาควอตซ์ในประเทศไทยจะอยู่ที่ประมาณ 1500 บาทต่อตันซึ่งถูกกว่าทรายแก้วที่นำเข้าจากต่างประเทศ

โซเดียมออกไซด์ (Na₂O)

โซเดียมออกไซด์เป็นตัวช่วยหลอมในแก้ว ทำให้น้ำแก้วมีความหนืดน้อยลงแต่ถ้ามีมากจะทำให้แก้วละลายน้ำ แหล่งที่มาของโซเดียมออกไซด์คือโซเดียมคาร์บอเนต

โซดาแอช

โซดาแอช หรือโซเดียมคาร์บอเนต เป็นวัตถุดิบที่ให้โซเดียม มีสูตรเคมีคือ Na₂CO₃ มีลักษณะเป็นผงสีขาว ไม่มีกลิ่น สามารถดูดความชื้นจากอากาศได้ดี ละลายได้ในน้ำมีฤทธิ์เป็นด่างแก่เมื่อละลายน้ำ โซดาแอชเกิดจากกระบวนการโซลเวย์ (Solvay process)^[36,37] โดยเปลี่ยนโซเดียมคลอไรด์เป็นโซเดียมคาร์บอเนตโดยใช้แอมโมเนียและแคลเซียมคาร์บอเนต โดยโซเดียมคาร์บอเนตจะเกิดการสลายตัวเมื่อได้รับความร้อนดังสมการข้างล่าง

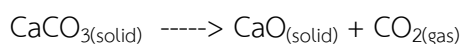


แคลเซียมออกไซด์และแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO / CaO)

เมื่อเติมแคลเซียมออกไซด์และแมกนีเซียมออกไซด์ในสูตรแก้วจะทำหน้าที่ตัดแปลงโครงสร้างเป็นตัวช่วยลดอุณหภูมิการหลอม ลดความหนืดของแก้ว แหล่งที่มาของแคลเซียมออกไซด์และแมกนีเซียมออกไซด์ได้มาจากโดโลไมต์และหินปูน

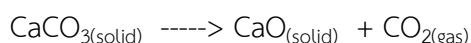
โดโลไมต์

องค์ประกอบทางเคมีของโดโลไมต์จะประกอบด้วย CaCO₃ และ MgCO₃ ทั่วไปจะพบเป็นเม็ดหยาบๆไปจนกระทั่งเม็ดเล็ก ปกติมักจะมีสีออกชมพู สีเนื้อ อาจไม่มีสีหรือสีขาว เทา เขียว น้ำตาล หรือดำ เนื้อแร่มีทั้งโปร่งใสถึงโปร่งแสง โดโลไมต์มีแหล่งกำเนิดจากหินปูนโดโลมิติก (Dolomitic limestone) หรือในหินอ่อนโดโลมิติก (Dolomitic marble) ในประเทศไทยพบแหล่งโดโลไมต์ที่จังหวัดกาญจนบุรี และสงขลา^[38] โดโลไมต์จะเกิดการสลายตัวเมื่อได้รับความร้อนดังสมการข้างล่าง



หินปูน

องค์ประกอบทางเคมีของหินปูนจะประกอบด้วย CaCO_3 แหล่งที่พบมากในประเทศ คือ แถบเทือกเขาหินปูนจังหวัดสระบุรี นครสวรรค์ กาญจนบุรี และนครศรีธรรมราช^[39] หินปูนจะเกิดการสลายตัวเมื่อได้รับความร้อนดังสมการข้างล่าง



อะลูมินา (Al_2O_3)

อะลูมินาทำหน้าที่เพิ่มสมบัติการทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลันและคงทนต่อสารเคมี แหล่งที่มาของอะลูมินาคือเฟลด์สปาร์

เฟลด์สปาร์

เฟลด์สปาร์ เป็นวัตถุดิบที่ให้อะลูมินา โดยทั่วไปพบเป็นแร่ในหินอัคนี หินแปรและหินชั้น แร่เฟลด์สปาร์จะพบเป็นแร่ที่ได้จากสายแร่ pegmatite แร่เฟลด์สปาร์ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติมีทั้งแร่ที่เป็นโซเดียมเฟลด์สปาร์และโปแตสเซียมเฟลด์สปาร์เกิดปะปนกันอยู่ มีทั้งที่แยกส่วนและที่เกิดร่วมกัน รวมทั้งแร่ควอตซ์ นอกจากนี้ยังมีสิ่งเจือปนอื่นที่เป็นแร่ที่มีเหล็กเป็นส่วนผสม ในประเทศไทยพบที่จังหวัดราชบุรี^[40]

2.3.2 บทบาทของวัตถุดิบ^[12,13,14]

Network former

Network former หรือ glass former ทำหน้าที่เป็นโครงสร้างหลัก เป็นตัวสร้าง network หรือเรียกว่า Glass forming oxide ซึ่งมีซิลิกา (SiO_2) เป็นวัตถุดิบสำคัญที่ทำให้เกิดแก้ว ได้มาจากทรายหรือแร่ควอตซ์ แต่โดยทั่วไปชื่อเรียกของแก้วจะเรียกตาม basic glass forming เช่น แก้วบอโรซิลิเกต จะมีซิลิกาและโบรอนออกไซด์ เป็น Network former

Network modifiers

Network modifiers หรือที่เรียกว่า ฟลักซ์ (flux) ทำหน้าที่ดัดแปลงโครงสร้าง เป็นตัวช่วยลดอุณหภูมิการหลอม ลดความหนืดของแก้ว การเติมฟลักซ์ทำให้สามารถลดต้นทุนในการผลิตแก้ว เนื่องจากฟลักซ์จะช่วยลดอุณหภูมิการหลอมให้เหลือน้อยกว่า 1600 °C แต่การเติมฟลักซ์ในปริมาณมากจะทำให้คุณสมบัติอื่นๆเปลี่ยนแปลงไป

Network modifiers มีหลายชนิดสามารถแบ่งกลุ่มได้แก่

อัลคาไลเอิร์ท : แบเรียม (Ba) แคลเซียม (Ca) แมกนีเซียม (Mg)

ในกลุ่มนี้จะช่วยเพิ่มความแข็งแรง ทำให้ทนต่อการขีดขูดและทนต่อสภาพอากาศ ทนต่อการถูกละลายด้วยกรดอินทรีย์เจือจาง ในกลุ่มนี้ CaO ได้มาจากโดโลไมต์และหินปูน MgO ได้มาจากโดโลไมต์

อัลคาไล : ลิเทียม (Li) โซเดียม (Na) โพแทสเซียม (K)

ในกลุ่มนี้จะเป็นตัวช่วยหลอม แต่ถ้าใช้ในปริมาณที่มากเกินไปทำให้แก้วมีความทนทานต่อสภาพอากาศและสารเคมีลดลง เมื่อใช้เป็นระยะเวลาหลายๆ แก้วจะเกิดเป็นฝ้าขาวที่เรียกว่าสนิมแก้ว ในกลุ่มนี้ Na_2O ได้มาจากโซดาแอช

ตะกั่ว (Pb) เมื่อเติมตะกั่วลงในแก้วจะทำให้ความวาวเพิ่มขึ้นแต่ถ้ามีปริมาณตะกั่วสูงจะไม่ทนต่อการขีดขูด ความทนทานต่อการขีดขูดลดลง ตะกั่วเป็น flux ที่แรงที่สุด ข้อดีคือลดการตกผลึกระหว่างปล่อยให้แก้วเย็นตัว ข้อเสียคือตะกั่วมีความเป็นพิษสูง

Intermediates

เป็นกลุ่มที่ช่วยเพิ่มสมบัติความแข็งแรงให้กับแก้ว ความทนทานต่อสารเคมี เพิ่มการทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลันและทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมี โดยทั่วไปคงทนกับกรด ยกเว้น กรดกัดแก้ว (HF) การเติมอะลูมินา (Al_2O_3) จะเป็นการช่วยเพิ่มสมบัติด้านความคงทนต่อสารเคมี ในกลุ่มนี้ Al_2O_3 ได้มาจากเฟลด์สปาร์

สารทำให้เกิดสี (colorant) ^[41,42,43,44,45,46,47,48]

ส่วนมากถูกนำมาใช้เพื่อให้ควบคุมการให้สีของแก้ว ส่วนมากจะเป็นกลุ่มโลหะทรานซิชัน

เหล็ก (Fe) ทำให้เกิดสีเขียว

แมงกานีส (Mn) ทำให้เกิดสีม่วง

โครเมียม (Cr) ทำให้เกิดสีเขียว

ยูเรเนียม (U) ทำให้เกิดสีเหลือง

วานาเดียม (V) ทำให้เกิดสีเขียว

นิกเกิล (Ni) ทำให้เกิดสีน้ำตาล

โคบอลต์ (Co) ทำให้เกิดสีน้ำเงิน

คาร์บอน (C) ทำให้เกิดสีน้ำตาล

คอปเปอร์ (Cu) ทำให้เกิดสีน้ำเงิน

ทอง (Au) ทำให้เกิดสีแดง

2.4 การผลิตบรรจุภัณฑ์แก้ว

2.4.1 การเตรียมวัตถุดิบ

การเตรียมวัตถุดิบจะเริ่มจากการตรวจสอบคุณภาพของวัตถุดิบชนิดต่างๆตามมาตรฐาน จากนั้นจะชั่งน้ำหนักวัตถุดิบตามสูตรของชนิดแก้วที่จะผลิต ในกระบวนการชั่งวัตถุดิบจะใช้ คอมพิวเตอร์ควบคุม เมื่อวัตถุดิบถูกชั่งแล้วเรียบร้อยแล้วจะถูกผสมให้วัตถุดิบเข้ากัน วัตถุดิบที่ผสมเข้ากันดีแล้ว จะถูกส่งไปยังเตาหลอมพร้อมกับเศษแก้ว

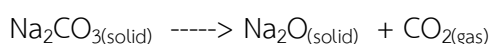
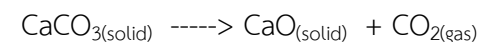
2.4.2 การหลอม

เมื่อวัตถุดิบมาสู่ในกระบวนการหลอมจะถูกให้ความร้อน ความร้อนในการหลอมแก้วจะใช้ แก๊สธรรมชาติและกระแสไฟฟ้า วัตถุดิบจะถูกหลอมเหลวที่อุณหภูมิในเตาหลอมประมาณ 1,500 °C และเมื่อหลอมได้ระยะหนึ่งจะเกิดฟองแก๊สจากปฏิกิริยาการหลอม เช่น CO₂ และ SO₃ โดยแก๊สเหล่านี้จะค่อยๆ ระบายออกจากเตาหลอมผ่านทางปล่อง เมื่อวัตถุดิบถูกหลอมเป็นน้ำแก้วแล้วถูกส่งไปยังกระบวนการขึ้นรูป

ในกระบวนการหลอมแก้ว โดยทั่วไปจะแบ่งกระบวนการหลอมได้ดังต่อไปนี้ การหลอมวัตถุดิบ (raw material melting) และการทำให้เป็นเนื้อเดียวกัน (homogenization)

1.) การหลอมวัตถุดิบ (raw material melting)

การหลอมของวัตถุดิบแก้วเบื้องต้นต้องผสมวัตถุดิบให้เข้ากันก่อนการหลอมเพื่อให้เวลาหลอมจะทำให้แก้วเป็นเนื้อเดียวกันอีกทั้งขนาดอนุภาคของวัตถุดิบก็มีผลต่อการหลอม โดยขนาดอนุภาคที่เล็กจะหลอมได้ง่ายกว่าขนาดอนุภาคที่ใหญ่ ในช่วงแรกของการให้ความร้อนจะเกิดการกำจัดความชื้น เมื่อถึงอุณหภูมิ 573 °C จะเกิดการเปลี่ยนเฟสของซิลิกาจากแอลฟาควอตซ์ไปเป็นเบต้าควอตซ์ จากนั้นเมื่อที่อุณหภูมิประมาณ 775 °C แก๊ส CO₂ เริ่มระบายออกจากวัตถุดิบที่มีคาร์บอนเนตเป็นองค์ประกอบเช่น



และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเรื่อยๆ วัสดุบางส่วนเกิดการหลอมเหลว ทำให้ของเหลวมีความหนืดสูง อีกทั้งออกซิเจนที่ถูกปล่อยมาในน้ำแก้วจะทำให้ oxidation state มีการเปลี่ยนแปลงและทำให้สีของ polyvalent ions; iron, chromium และอื่นๆมีการเปลี่ยนแปลง สุดท้ายซิลิกาหลอมจนกลายเป็นน้ำแก้ว

ในกระบวนการหลอมแก้วควรระวังเรื่ององค์ประกอบของวัสดุที่นำมาใช้เช่น ในกระบวนการหลอมจะใช้ทรายเป็นวัสดุแต่เมื่อเปลี่ยนวัสดุจากทรายมาเป็นควอตซ์ ควรระวังเรื่องของสีแก้วที่ได้เนื่องจากควอตซ์จะมีเหล็กเป็นองค์ประกอบในปริมาณที่ค่อนข้างสูงซึ่งจะทำให้แก้วมีสีเขียว

2.) การทำให้เป็นเนื้อเดียวกัน (homogenization)

น้ำแก้วจากการหลอมต้องถูกทำให้เป็นเนื้อเดียวกันโดยปราศจากฟองอากาศก่อนเข้ากระบวนการขึ้นรูป กระบวนการทำให้เป็นเนื้อเดียวกันทำได้โดยการใช้สารไล่ฟองเพื่อไล่ฟองอากาศในน้ำแก้ว ตัวอย่างของสารไล่ฟองได้แก่ Sb_2O_3 , As_2O_5 , Na_2SO_4 โดยสารไล่ฟองจะปล่อยฟองอากาศเล็กๆเป็นปริมาณมากและจะจับตัวเป็นฟองอากาศขนาดใหญ่และลอยขึ้นไปบนผิวน้ำแก้ว ทำให้แก้วที่ได้มีความเป็นเนื้อเดียวกัน

2.4.2.1 ขนาดของอนุภาคต่อการหลอม

โดยอนุภาคขนาดเล็กจะหลอมได้ดีกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ แต่ถ้าอนุภาคขนาดเล็กมากจะเกิดการจับตัวเป็นก้อน agglomerate ที่มีความพรุนตัวและป้องกันไม่ให้ของเหลวผ่านเข้าไปละลายวัสดุ นอกจากนี้น้ำแก้วทำให้อัตราการละลายตัวลดลง

2.4.2.2 Batch-free-time มหาวิทยาลัย

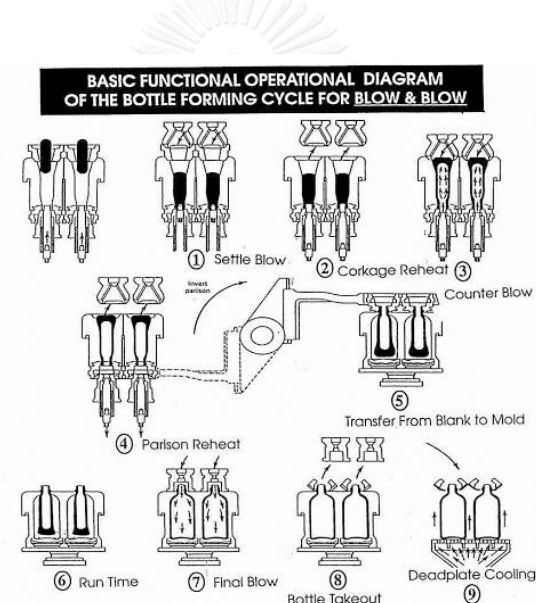
Batch-free-time คือการหาระยะเวลาในการหลอมที่เหมาะสมต่อการที่ทำให้วัสดุหลอมตัวจนกลายเป็นแก้วอย่างสมบูรณ์ โดยการทดสอบจะเริ่มจากการใส่เศษแก้วใส่ลงในเบ้าแล้วหลอมจนกลายเป็นน้ำแก้วจากนั้น batch ที่ต้องการทดสอบลงไป โดยที่ batch จะค่อยหลอมตัวในน้ำแก้ว จากนั้นนำออกจากเตาหลอมตามระยะเวลาที่กำหนด ซึ่งการหลอมตัวของ batch จะแปรผันตามระยะเวลาการหลอม ปัจจัยที่ส่งผลต่อ batch-free-time ได้แก่ 1. วัสดุที่ใช้ ถึงแม้จะเป็นแก้วชนิดเดียวกันแต่วัสดุต่างกันก็ทำให้ระยะเวลาการหลอมที่ต่างกัน 2. ขนาดของอนุภาค ขนาดอนุภาคขนาดเล็กจะทำให้เกิดการหลอมตัวได้ดีกว่าขนาดอนุภาคขนาดใหญ่ 3. การผสมของวัสดุ วัสดุที่ผสมให้เข้ากันจะทำให้เกิดการหลอมได้ง่าย

2.4.3 การขึ้นรูป

น้ำแก้วจากเตาหลอมจะถูกส่งไปยังสายการผลิต โดยน้ำแก้วจะถูกตัดเป็นก้อนแก้วหรือเรียกว่า gob ซึ่งก้อนแก้วจะต้องให้มีขนาดและอุณหภูมิที่เหมาะสมและมีน้ำหนักของก้อนแก้วเท่ากับขวดแก้วที่จะผลิต กระบวนการขึ้นรูปบรรจุภัณฑ์แก้วที่ใช้กันแบ่งเป็นสองแบบ ได้แก่

1. Blow and Blow process ใช้ผลิตขวดปากแคบ

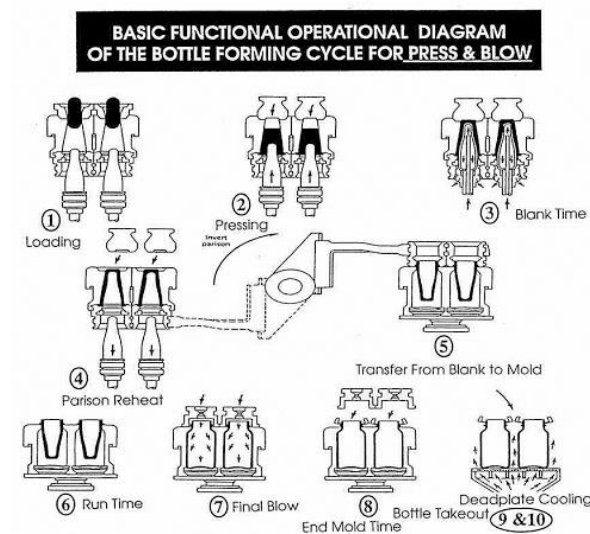
เริ่มจากนำ gob เข้ามาในแม่พิมพ์ชุดแรก (blank) และให้แรงดันต้น Gob ให้ติดกับแม่พิมพ์ (blank) เมื่อติดแล้วจะมีลมเป่าเข้ามาใน gob ทำให้เกิดช่องว่างด้านในเรียกว่า Blank shape และเรียกการขึ้นรูปขั้นต้นว่า พาริสัน (parison) จากนั้นถูกส่งมายังแม่พิมพ์ตัวที่สอง (mould) หรือแม่พิมพ์สำหรับขึ้นรูปปลาทู เมื่อถูกส่งมายังแม่พิมพ์ที่สอง จะถูกเป่าลมอีกครั้งเพื่อให้ได้รูปทรงขวดตามที่ต้องการ บรรจุภัณฑ์แก้วที่ได้จากกระบวนการนี้ได้แก่ ขวดน้ำอัดลม ขวดเปียร์



รูปที่ 2.11 การบวนการขึ้นรูปขวดแบบ Blow and Blow process^[49]

2. Press and Blow process ใช้ผลิตขวดปากกว้าง

เริ่มจากนำ gob เข้ามาในแม่พิมพ์ชุดแรก (blank) จากนั้นแม่พิมพ์จะถูกดันให้ขึ้นไปติดกับ gob จากนั้นจะถูกส่งมายังแม่พิมพ์ตัวที่สอง (mould) เมื่อถูกส่งมายังแม่พิมพ์ที่สอง จะถูกเป่าลมอีกครั้งเพื่อให้ได้รูปทรงขวดตามที่ต้องการ บรรจุภัณฑ์แก้วที่ได้จากกระบวนการนี้ได้แก่ ขวดบรรจุอาหาร



รูปที่ 2.12 การบวนการขึ้นรูปขวดแบบ Press and Blow process^[49]

2.4.4 การอบอ่อน

บรรจุภัณฑ์แก้วที่ขึ้นรูปแล้วจะถูกอบอ่อนเพื่อปรับลดอุณหภูมิลงอย่างช้าๆจากประมาณ 570 °C ให้ค่อยๆ เย็นลงจนถึงอุณหภูมิปกติ จากนั้นจะถูกตรวจสอบคุณภาพและบรรจุภัณฑ์ต่อไป

2.5 สมบัติทางความร้อนของแก้ว

การทดสอบสมบัติทางความร้อนเนื่องจากในการผลิตแก้วจะต้องใช้ที่อุณหภูมิสูง อีกทั้งสมบัติทางความร้อนของแก้วจะขึ้นกับวัสดุดิบซึ่งแก้วชนิดเดียวกันแต่ใช้วัสดุดิบที่ต่างกันสมบัติทางความร้อนที่ได้ก็ต่างกัน ดังนั้นสมบัติทางความร้อนของแก้วจึงเป็นสมบัติพื้นฐานที่สำคัญในการนำไปใช้งาน

2.5.1 การขยายตัวเนื่องจากความร้อน

แก้วจะเกิดการขยายตัวเมื่อได้รับความร้อน การเปลี่ยนแปลงความยาวต่ออุณหภูมิของแก้วสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\alpha = \Delta L / (L_o \Delta T)$$

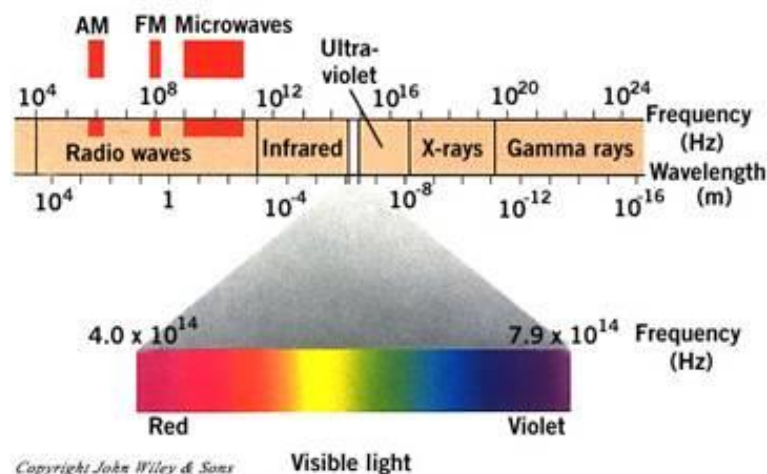
โดยที่ α คือสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน, ΔT คืออุณหภูมิห้องที่เปลี่ยนแปลงไป, L_o คือ ความยาวของชิ้นงานที่อุณหภูมิห้อง, ΔL คือ ความยาวของชิ้นงานที่อุณหภูมิสูงสุด

2.5.2 ความหนืดของแก้ว

ความหนืดของแก้วมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อแก้ว โดยความหนืดจะเป็นตัวกำหนดความยากง่ายในการหลอม การขึ้นรูป อุณหภูมิที่ใช้ในผลิต การวัดความหนืดของแก้วจะแสดงผลในรูปของ curve ระหว่างความหนืดกับอุณหภูมิซึ่งที่ความหนืดต่างๆจะแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมของแก้ว เช่น ที่ความหนืด 10^3 Pa.s คือจุดที่แก้วเหมาะสำหรับการขึ้นรูป ที่ความหนืด 10^{12} คือจุดที่แก้วเหมาะสำหรับการอบอ่อน

2.6 แสงและสี

แสงเป็นพลังงานรูปหนึ่ง เดินทางในรูปคลื่นด้วยอัตราเร็วสูง 300,000 กิโลเมตรต่อวินาที แหล่งกำเนิดแสงมีทั้งแหล่งกำเนิดที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติและจากมนุษย์สร้างขึ้น แสงช่วงที่ตามนุษย์สามารถมองเห็น (visible range) มีค่าความยาวคลื่นอยู่ระหว่าง 380 – 780 นาโนเมตร โดยแสงสีม่วงซึ่งมีความยาวคลื่นน้อยที่สุดและสีแดงมีความยาวคลื่นมากที่สุด



รูปที่ 2.13 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าช่วงที่ตามองเห็น^[50]

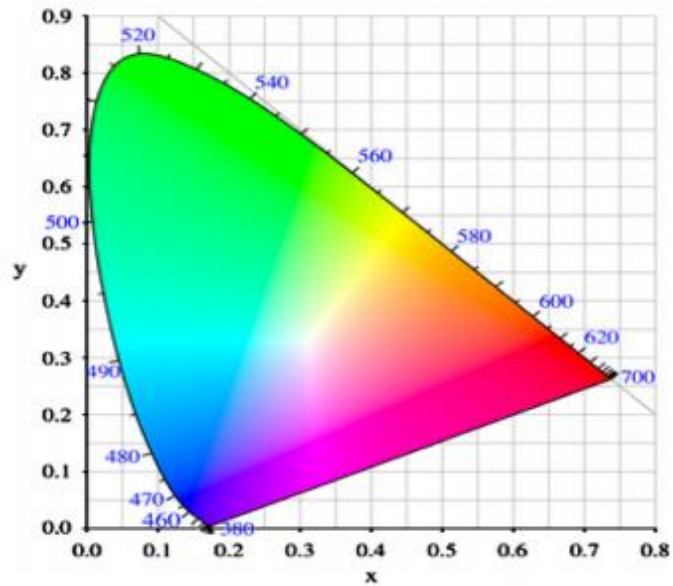
การมองเห็นสีต่าง ๆ บนวัตถุเกิดจากการผสมของแสงสี ได้แก่ สีแดง สีเขียว และแสงสีน้ำเงิน โดยแสงสีทั้ง 3 จะเรียกว่า สีปฐมภูมิ แต่ถ้านำแสงสีปฐมภูมิ 2 สีรวมกันจะเกิดเป็น สีทุติยภูมิ ซึ่งสีทุติยภูมิแต่ละสีจะมีความแตกต่างกันในระดับความเข้มสีและความสว่างของแสง ปัจจุบันสีทั้งหมดในระบบ CIE Lab scale ได้ถูกมารวมในไดอะแกรมรูปเกือกม้าหรือเรียกว่า chromaticity diagram นอกจากนี้สีทุกสีจะมีค่า color coordinate (a^* , b^*) อยู่ใน color space diagram

color space diagram จะแสดงค่า L^* , a^* , b^*

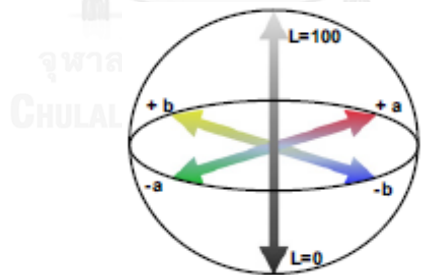
L^* จะแสดงค่าของความสว่างมีค่าจาก 0-100 ที่จากความสว่างน้อยไปมาก

a^* จะแสดงค่าของสีเขียวหรือสีแดงโดยที่ $-a$ จะแสดงถึงสีเขียว $+a$ จะแสดงถึงสีแดง

b^* จะแสดงค่าของสีน้ำเงินหรือสีเหลือง โดยที่ $-b$ จะแสดงถึงสีน้ำเงิน $+b$ จะแสดงถึงสีเหลือง



รูปที่ 2.14 Chromaticity diagram ^[51]



รูปที่ 2.15 Color space diagram ^[52]

2.7 พลังงานความร้อนที่ใช้หลอมแก้ว^[53,54]

พลังงานที่ใช้ในการหลอมแก้วสามารถคำนวณจากพลังงานที่ใช้ในกระบวนการหลอมวัตถุดิบจนถึงอุณหภูมิน้ำแก้ว

H_{ex} คือพลังงานความร้อนที่ใช้ในกระบวนการหลอมวัตถุดิบจากอุณหภูมิบรรยากาศ (298 K) ถึงอุณหภูมิน้ำแก้ว (T_{ex}) ซึ่งสามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$H_{ex} = (1-y_c) \Delta H_{chem}^\circ + \Delta H_{melt}(T_{ex}) \quad (1)$$

โดย y_c คืออัตราส่วนของเศษแก้วที่ใช้ในวัตถุดิบ

ΔH_{chem}° คือ ค่าความร้อน (enthalpy) ที่ใช้ในปฏิกิริยาทางเคมีในการแปรสภาพวัตถุดิบที่ผสมกันแล้ว (batch) ที่สภาวะปกติ (Standard state) ไปเป็นแก้วกับแก๊สของ batch ที่อุณหภูมิบรรยากาศ (298 K)



ΔH_{chem}° สามารถคำนวณได้จาก

$$\Delta H_{chem}^\circ = H_{glass}^\circ + H_{gas}^\circ - H_{batch}^\circ \quad (2)$$

โดย H_{glass}° คือ ค่าความร้อนมาตรฐาน (standard enthalpy) ของแก้วที่อุณหภูมิบรรยากาศ (298 K) ความดันบรรยากาศ 1 บาร์

H_{gas}° คือ ผลรวมค่าความร้อนมาตรฐานของแก๊สที่ปล่อยออกมาจากการหลอมวัตถุดิบ

H_{batch}° คือ ผลรวมค่าความร้อนมาตรฐานของวัตถุดิบที่ใช้แต่ละชนิด

$$H_{batch}^\circ = \sum (w_b(i) \times H^\circ(i)) \quad (3)$$

$$H_{gas}^\circ = \sum (w_g(i) \times H^\circ(i)) \quad (4)$$

$\Delta H_{melt}(T_{ex})$ คือ ค่าความร้อนที่สะสมในน้ำแก้ว (melt) ที่อุณหภูมิ T_{ex} เทียบกับที่อุณหภูมิบรรยากาศ (298 K) สามารถคำนวณได้จาก

$$\Delta H_{melt}(T_{ex}) = H_{T,melt} - H_{glass}^\circ \quad (5)$$

โดย $H_{T,melt}$ คือ ค่าความร้อนของน้ำแก้วที่อุณหภูมิ T

ค่า H_{glass}° และ $H_{T,melt}$ สามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$H_{glass}^\circ = \sum_k n_k \cdot (H_k^\circ + H_k^{vit}) \quad (6)$$

$$H_{T,melt} = H_{1673,melt}^\circ + c_{p,melt} \cdot (T - 1673) \quad (7)$$

$$H^{\circ}_{1673, melt} = \sum_k n_k \cdot H^{\circ}_{1673, melt, k} \quad (8)$$

$$c_{p, melt} = \sum_k n_k \cdot c_{p, melt, k} \quad (9)$$

โดย H°_k คือค่าความร้อนมาตรฐาน (standard enthalpy) ของเฟส k ในแก้วที่อุณหภูมิ 298 K

H^{vit}_k คือ ค่าความร้อนของการกลายเป็นแก้ว (vitrification enthalpy) ของ เฟส k ในแก้ว

$H^{\circ}_{1673, melt}$ คือ ค่าความร้อนของน้ำแก้วที่อุณหภูมิ 1400 °C (1673.15 K)

$C_{p, melt}$ คือ ค่าความจุความร้อนของน้ำแก้ว

$H^{\circ}_{1673, melt, k}$ คือ ค่าความร้อนของเฟส k ในแก้วที่สถานะของเหลวที่ 1673.15 K

$C_{p, melt, k}$ คือ ค่าความจุความร้อนของ เฟส k ในแก้วที่สถานะของเหลว

n_k คือ ปริมาณ molar ของเฟส k ในแก้ว

เมื่อแทนสมการที่ 7 ในสมการที่ 5 จะได้

$$\Delta H_{melt}(T_{ex}) = (H^{\circ}_{1673, melt} - H^{\circ}_{glass}) + c_{p, melt} \cdot (T_{ex} - 1673) \quad (10)$$

โดย $H^{\circ}_{1673, melt} - H^{\circ}_{glass}$ คือผลต่างของค่าความร้อนที่สะสมในน้ำแก้วที่อุณหภูมิ 1673 K กับ

ค่าความร้อนมาตรฐานของแก้วที่อุณหภูมิบรรยากาศ (298 K) ความดันบรรยากาศ 1 บาร์

ตารางที่ 2.4 ค่าความร้อนมาตรฐาน (H°) ของวัตถุดิบแก้วและแก๊สในวัตถุดิบแก้ว

วัตถุดิบแก้ว	ค่าความร้อนมาตรฐาน H° (kWh/kg)
ควอตซ์ (SiO_2)	4.2112
ทรายแก้ว (SiO_2)	4.2112
หินปูน (CaCO_3)	3.3495
เฟลด์สปาร์ ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$)	4.1648
โดโลไมต์ ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$)	3.4873
โซดาแอช (Na_2CO_3)	2.9608
โครเมียมออกไซด์ (Cr_2O_3)	2.0615
แบเรียมคาร์บอเนต (BaCO_3)	1.7159
เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3)	1.4337
โพแทสเซียมไนเตรต (KNO_3)	1.3572
ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2)	3.2867
เซอร์โคเนียมไดออกไซด์ (ZrO_2)	2.4347
แก๊ส	ค่าความร้อน H° (kWh/kg)
คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2)	2.484
คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)	1.096
ไนโตรเจนออกไซด์ (NO)	-0.836
ไอน้ำ (H_2O)	3.728

ตารางที่ 2.5 สมบัติเทอร์โมไดนามิกส์ของเฟสในแก้วประกอบด้วยเอนทาลปี (H, kJ/mol) เอนโทรปี (S) และค่าความจุความร้อน (J/(mol·k))

K	-H°	S°	H _{vit}	S _{vit}	- H _{1673,melt}	S _{1673,melt}	C _{P,melt}
P ₂ O ₅ ·3CaO	4117.1	236	135.1	51.5	3417.1	898.7	324.3
P ₂ O ₅	1492	114.4	18.2	9.5	1138.5	586.6	181.6
Fe ₂ O ₃	823.4	87.4	45.2	17.2	550.2	370.3	142.3
FeO·Fe ₂ O ₃	1108.8	151	82.8	31.4	677.8	579.9	213.4
FeO·SiO ₂	1196.2	92.8	36.7	13.8	962.3	342.7	139.7
2FeO·SiO ₂	1471.1	145.2	55.2	20.5	1118.8	512.1	240.6
MnO·SiO ₂	1320.9	102.5	40.2	15.1	1085.3	345.2	151.5
2ZnO·SiO ₂	1643.1	131.4	82.4	31.4	1261.1	494.5	174.5
ZrO ₂ ·SiO ₂	2034.7	84.5	86.6	32.6	1686.2	381.2	149.4
CaO·TiO ₂	1660.6	93.7	67.4	25.5	1365.7	360.2	124.7
TiO ₂	903.7	185.4	40.2	19.7	741	335.6	87.9
BaO·Al ₂ O ₃ ·2SiO ₂	4222.1	236.8	130.5	95.4	3454.3	1198.3	473.2
BaO·2SiO ₂	2553.1	154	81.6	26.8	2171.1	533.5	241.4
BaO·SiO ₂	1618	104.6	56.5	41	1349.8	361.1	146.4
Li ₂ O·Al ₂ O ₃ ·4SiO ₂	6036.7	308.8	184.1	12.1	5235.4	1173.2	498.7
Li ₂ O·SiO ₂	1648.5	79.9	16.7	6.3	1416.7	339.7	167.4
K ₂ O·Al ₂ O ₃ ·6SiO ₂	7914	439.3	106.3	29.3	6924.9	1559.4	765.7
K ₂ O·Al ₂ O ₃ ·2SiO ₂	4217.1	266.1	80.4	22.1	3903.7	666.5	517.6
K ₂ O·4SiO ₂	4315.8	265.7	26.4	21.3	3697.8	983.7	410
K ₂ O·2SiO ₂	2508.7	190.6	12.6	23.9	2153.1	595.4	275.3
Na ₂ O·Al ₂ O ₃ ·6SiO ₂	7841.2	420.1	125	28.4	6870.1	1512.5	648.1
Na ₂ O·Al ₂ O ₃ ·2SiO ₂	4163.5	248.5	92	27.9	3614.1	856.9	423.8
B ₂ O ₃	1273.5	54	18.2	11.3	1088.7	271.1	129.7
Na ₂ O·B ₂ O ₃ ·4SiO ₂	5710.9	270	42.7	21.1	4988	1090.2	637.6
Na ₂ O·4B ₂ O ₃	5902.8	276.1	58.3	40.1	4986.7	1275.5	704.2
Na ₂ O·2B ₂ O ₃	3284.9	189.5	48.8	26.6	2735.9	780.3	444.8
Na ₂ O·B ₂ O ₃	1958.1	147.1	43.6	19.5	1585.7	538.7	292.9

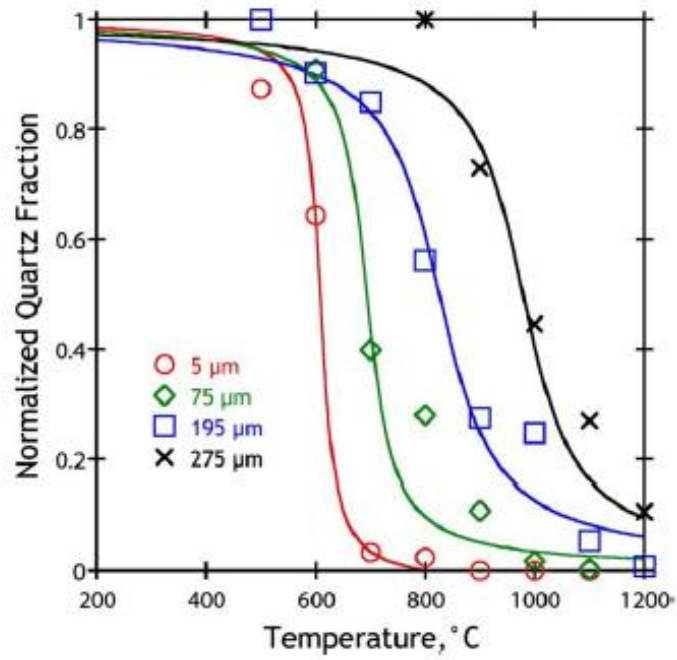
K	$-H^\circ$	S°	H_{vit}	S_{vit}	$-H_{1673,melt}$	$S_{1673,melt}$	$C_{p,melt}$
$2MgO \cdot 2Al_2O_3 \cdot 5SiO_2$	9113.2	407.1	135.8	41.4	7994.8	1606.2	1031.8
$MgO \cdot SiO_2$	1548.5	67.8	46.6	13.6	1318	296.2	146.4
$2MgO \cdot SiO_2$	2176.9	95.4	61.4	11	1876.1	402.9	205
$CaO \cdot MgO \cdot 2SiO_2$	3202.4	143.1	92.3	25.7	2733.4	621.7	355.6
$2CaO \cdot MgO \cdot 2SiO_2$	3876.9	209.2	106.7	32	3319.2	775.3	426.8
$CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$	4223.7	202.5	103	37.7	3628.8	791.2	380.7
$2CaO \cdot Al_2O_3 \cdot SiO_2$	3989.4	198.3	129.9	49.4	3374	787.8	299.2
$3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$	6820.8	274.9	188.3	71.5	5816.2	1231.8	523.4
$CaO \cdot SiO_2$	1635.1	83.1	49.8	18.8	1382	329.7	146.4
$2CaO \cdot SiO_2$	2328.4	120.5	101.3	38.5	1868.2	509.2	174.5
$Na_2O \cdot 2SiO_2$	2473.6	164.4	29.3	13.2	2102.5	588.7	261.1
$Na_2O \cdot SiO_2$	1563.1	113.8	37.7	9.8	1288.3	415.1	179.1
$3Na_2O \cdot 8SiO_2$	9173	597	94.2	34.2	-	-	-
$Na_2O \cdot 3CaO \cdot 6SiO_2$	8363.8	461.9	77.3	20.5	7372.6	1555.6	786.6
$Na_2O \cdot 2CaO \cdot 3SiO_2$	4883.6	277.8	57.7	13.4	4240.9	990.4	470.3
$2Na_2O \cdot CaO \cdot 3SiO_2$	4763	309.6	87	22.6	4029.6	1107.9	501.2
$Na_2O \cdot CaO \cdot 5SiO_2$	5934	349	63.3	30.4	-	-	-
SiO_2	908.3	43.5	6.9	4	809.6	157.3	86.2

สัญลักษณ์ ° คือ สภาวะอ้างอิงที่ 298.15 K, 1 บาร์; vit คือ vitrification; melt คือของเหลว; 1673 คือ 1673.15 K

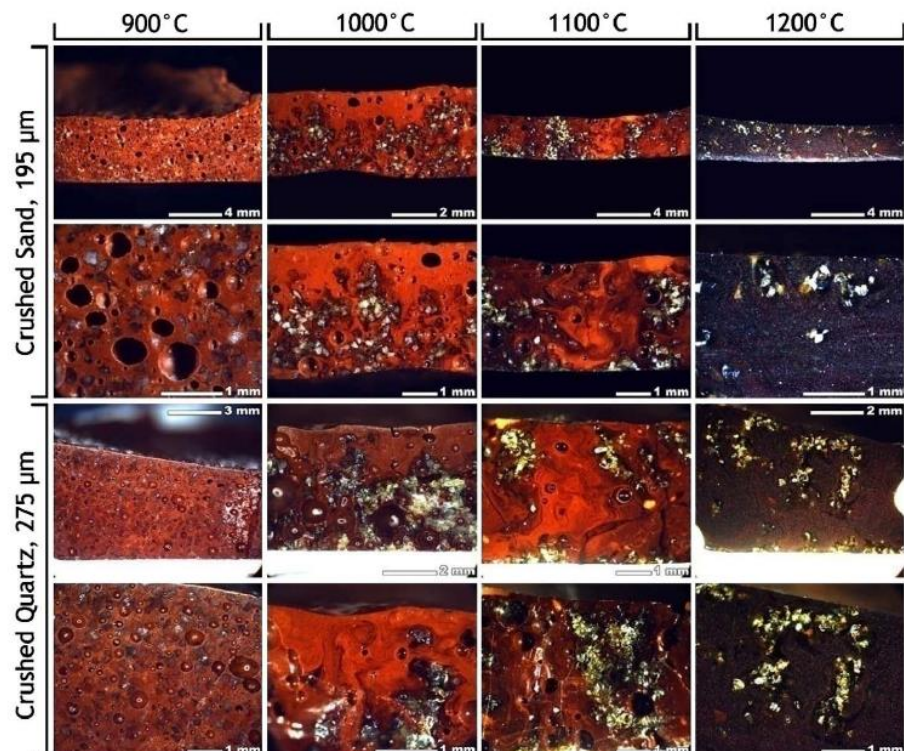
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปี ค.ศ. 1990 Sheckler, C. A. และคณะ^[55] ได้ศึกษาผลของการหลอมและผลของความเป็นผลึก โดยศึกษาปฏิกิริยาของวัตถุดิบและการหลอมของช่วงขนาดอนุภาคซิลิกาที่แตกต่างกัน ในการทดลองแบ่งขนาดอนุภาคซิลิกาเป็น 3 ช่วงขนาด ได้แก่ ขนาดเล็ก (< 53 ไมโครเมตร) ขนาดกลาง (125-180 ไมโครเมตร) และขนาดใหญ่ (425-500 ไมโครเมตร) โดยให้ขนาดของอนุภาคโซดาแอช และ หินปูนคงที่ที่ช่วง (< 53 ไมโครเมตร) ในงานวิจัยเบื้องต้นได้ศึกษาสมบัติเชิงความร้อนของวัตถุดิบโดย ชุดแรกจะผสมซิลิกากับโซดาแอช และชุดที่สองซิลิกากับหินปูน จากการทดลองพบว่าซิลิกากับโซดาแอชจะเกิดการสลายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์ที่มากในช่วงอุณหภูมิ 800-850 °C และ ซิลิกากับหินปูนเกิดที่ช่วงอุณหภูมิ 780 °C จากนั้นเป็นการทดสอบการหลอมที่ขนาดอนุภาคของ ซิลิกาต่างกัน โดยผสมวัตถุดิบเข้าด้วยกันโดยใช้ซิลิการ้อยละ 62 โดยน้ำหนัก หินปูนร้อยละ 16 โดยน้ำหนักและโซดาแอชร้อยละ 22 โดยน้ำหนัก ทดสอบที่อุณหภูมิ 775 790 805 820 835 850 และ 865 °C จากผลจากงานวิจัยนี้จะแสดงให้เห็นถึงการเกิดปฏิกิริยาของวัตถุดิบเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป

ในปี ค.ศ. 2010 Schweiger, M.^[56] และคณะได้ศึกษาการสลายตัวของอนุภาคซิลิกาที่ขนาดต่างๆ ในการทดลองให้อุณหภูมิสูงสุดที่ 1200 °C ให้อัตราความร้อนที่ 5 °C/min จากการทดลองพบว่าอนุภาคซิลิกาขนาดเล็กจะหลอมดีกว่าอนุภาคซิลิกาขนาดใหญ่ซึ่งจะแสดงในรูปที่ 2.16 จากนั้นได้ทดลองหลอมแก้วที่มีส่วนผสมของทรายที่ขนาดอนุภาค 195 ไมโครเมตรเทียบกับแก้วที่มีส่วนผสมควอตซ์ที่ขนาดอนุภาค 275 ไมโครเมตรและหลอมที่อุณหภูมิสูงสุดที่ 1200 °C จากนั้นได้ตัดชิ้นงานแก้วที่ถูกหลอมที่อุณหภูมิ 900-1200 °C ผลปรากฏว่าที่อุณหภูมิ 1000 °C เริ่มเกิดหลอมเป็นเนื้อแก้วมีการจับตัวกันของอนุภาคซิลิกา เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นกลุ่มอนุภาคซิลิกาเริ่มลอยขึ้นบนผิวแก้วซึ่งจะแสดงในรูปที่ 2.17

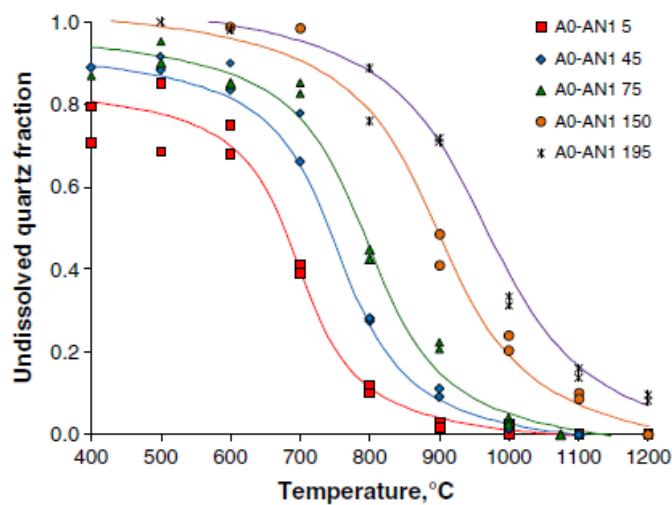


รูปที่ 2.16 อัตราส่วนการหลอมของควอตซ์ที่ขนาดอนุภาคต่างกัน



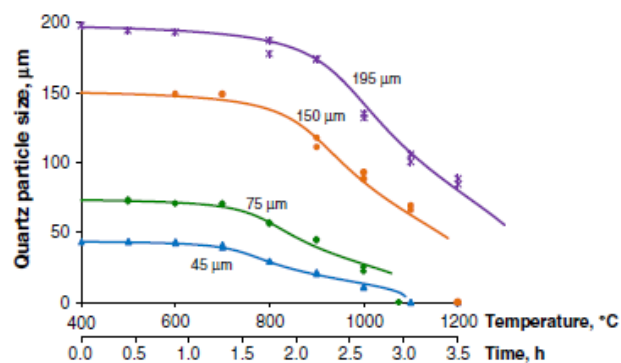
รูปที่ 2.17 การหลอมของแก้วที่มีองค์ประกอบของทรายและควอตซ์ที่อุณหภูมิ 900-1200 °C

ในปี ค.ศ. 2011 Hirma, P. และคณะ^[57] ได้ศึกษาการสลายตัวของอนุภาคควอตซ์ที่ขนาดต่างๆ ในการทดลองได้ผสมส่วนผสมโดยให้ขนาดอนุภาคที่ต่างกันแบ่งเป็นห้าขนาดอนุภาคควอตซ์ที่ 5 ไมโครเมตร (A0-AN1 5) 45 ไมโครเมตร (A0-AN1 45) 75 ไมโครเมตร (A0-AN1 75) 150 ไมโครเมตร (A0-AN1 150) และ 195 ไมโครเมตร (A0-AN1 195) โดยทดลองที่อุณหภูมิสูงสุดที่ 1200 °C ผลจากงานวิจัยนี้พบว่าอนุภาคควอตซ์ขนาดเล็กจะหลอมดีกว่าอนุภาคควอตซ์ขนาดใหญ่ซึ่งจะแสดงในรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 อัตราส่วนที่ไม่ละลายของควอตซ์ที่ขนาดอนุภาคต่างกัน

ในปี ค.ศ. 2011 Hirma, P. และคณะ^[58] ได้ศึกษาการทำปฏิกิริยาการหลอมของควอตซ์ที่ขนาดอนุภาคต่างๆ โดยศึกษาขนาดอนุภาคควอตซ์ที่ 45 75 150 และ 195 ไมโครเมตร ผลจากงานวิจัยนี้พบว่า การกระจายของขนาดอนุภาคมีอิทธิพลสำคัญต่อการสลายตัว ซึ่งจะแสดงในรูปที่ 2.19

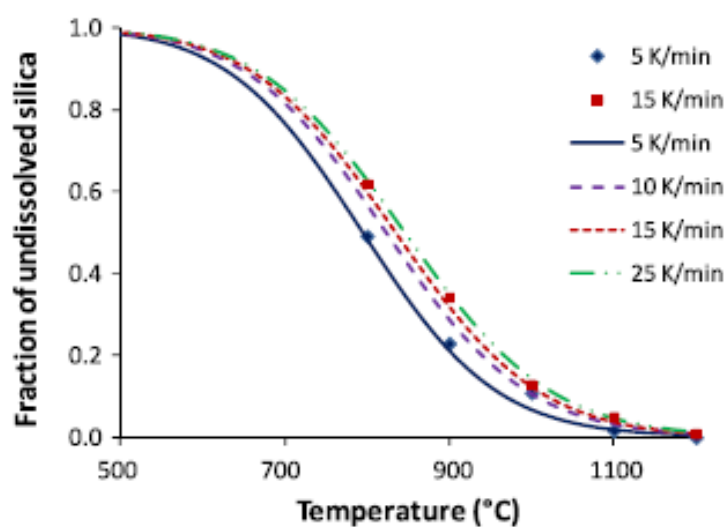


รูปที่ 2.19 การละลายของควอตซ์ที่ขนาดอนุภาคต่างกัน

ในปี ค.ศ. 2013 Pokorny, R. และคณะ^[59] ได้ศึกษาการสลายตัวของอนุภาคควอตซ์ โดยใช้วัสดุดิบในการทดลองตามตารางที่ 2.7 ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 100-1400 °C โดยมีอัตราการให้ความร้อนต่างกันคือ 5 10 15 20 และ 25 K/min ผลจากงานวิจัยนี้พบว่าอัตราการให้ความร้อนมีผลต่อการสลายตัว โดยที่การให้อัตราความร้อนที่น้อยจะมีการสลายตัวได้ดีกว่าการให้อัตราความร้อนสูงซึ่งแสดงในรูปที่ 2.20

ตารางที่ 2.6 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุดิบในการหลอมแก้ว

Compound	g kg ⁻¹
Al(OH) ₃	367.49
H ₃ BO ₃	269.83
CaO	60.79
Fe(OH) ₃	73.82
Li ₂ CO ₃	88.30
Mg(OH) ₂	1.69
NaOH	99.41
SiO ₂	305.05
Zn(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O	2.67
Zr(OH) ₄ ·0.65H ₂ O	5.49
Na ₂ SO ₄	3.55
Bi(OH) ₃	12.80
Na ₂ CrO ₄	11.13
KNO ₃	3.04
NiCO ₃	6.36
Pb(NO ₃) ₂	6.08
Fe(H ₂ PO ₂) ₃	12.42
NaF	14.78
NaNO ₂	3.37
Na ₂ C ₂ O ₄	1.26
Total	1349.32



รูปที่ 2.20 อัตราส่วนที่ไม่ละลายของควอตซ์ที่อัตราการให้ความร้อนต่างกัน

ในปี ค.ศ. 2012 Meechoowas, E. และคณะ^[60] ได้ศึกษาการปรับสูตรแก้วโซดาไลม์ โดยใช้ วอลลาสโตไนต์ (CaSiO_3) แทนที่โดโลไมต์ ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) จากนั้นคำนวณพลังงานทางเทอร์โมไดนามิกส์และเปรียบเทียบพฤติกรรมการหลอมด้วยวิธี Batch-free time และทดสอบคุณสมบัติของแก้ว ในการทดลองใช้องค์ประกอบทางเคมีคือ $74\text{SiO}_2\text{-}16\text{Na}_2\text{O}\text{-}10\text{CaO}$ โดยชุดแรกเป็นองค์ประกอบทางเคมีของ $\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{CO}_3\text{-CaCO}_3$ และชุดสองเป็นองค์ประกอบทางเคมีของ $\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{CO}_3\text{-CaSiO}_3$ ในการทดสอบเปรียบเทียบพฤติกรรมการหลอมด้วยวิธี Batch-free time โดยใช้ อุณหภูมิในการทดสอบที่ $1400\text{ }^\circ\text{C}$ ใช้เวลาในการทดสอบ 10-60 นาที พบว่าที่เวลา 40 นาทีของสูตรที่ 2 ไม่มีผลึกหลงเหลืออยู่ในแก้วแต่สูตรที่ 1 ยังพบผลึกในแก้ว ได้ทดสอบคำนวณพลังงานทางเทอร์โมไดนามิกส์พบว่าพลังงานความร้อนที่ใช้หลอมแก้ว (Hex) สูตรที่ 1 ใช้พลังงาน $2.3\text{ GJ/t}_{\text{glass}}$ สูตรที่ 2 ใช้พลังงาน $2.1\text{ GJ/t}_{\text{glass}}$ ผลจากการทดลองแสดงให้เห็นว่าสูตรที่ 2 ที่ใช้วอลลาสโตไนต์แทนโดโลไมต์ ใช้พลังงานน้อยกว่าสูตรที่ 1 ทั้งในการคำนวณพลังงานทางเทอร์โมไดนามิกส์และเปรียบเทียบพฤติกรรมการหลอมด้วยวิธี Batch-free time จากนั้นในงานวิจัยได้ทดสอบคุณสมบัติของแก้ว โดยชั่งน้ำหนักวัตถุดิบ 150 กรัม ใช้อุณหภูมิ $1500\text{ }^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และอบแก้วที่อุณหภูมิ $570\text{ }^\circ\text{C}$ ผลการทดสอบด้วยเครื่อง Dilatometric พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของแก้วทั้ง 2 สูตรมีค่าใกล้เคียงกันซึ่งจะแสดงให้เห็นในตารางที่ 2.8 นอกจากนี้ในงานวิจัยยังศึกษาความหนืดและสีของแก้ว ผลที่ได้คือค่าความหนืดมีค่าใกล้เคียงกันและสีของแก้วสูตรที่ 2 เขียวกว่าสูตรที่ 1 เนื่องจากวอลลาสโตไนต์จากธรรมชาติมีเหล็กเป็นองค์ประกอบ

ตารางที่ 2.7 สัมประสิทธิ์การขยายตัวของแก้วสูตรที่ 1 (Glass A) สูตรที่ 2 (Glass B)

Thermal properties by Dilatometric method	Glass A	Glass B
The coefficient of thermal expansion 50-300 °C (COE, °C ⁻¹)	10.18×10^{-6}	9.95×10^{-6}
Glass tranformation temperature (°C)	543	540
Dilatometric softening point (°C)	619	619

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาอิทธิพลของแร่ควอตซ์และทรายที่มีผลต่อการหลอมและศึกษาสมบัติของแก้วโซดาไลม์สีเขียวเปรียบเทียบกับระหว่างใช้แร่ควอตซ์และทราย

3.1 สารเคมีและวัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง

- 3.1.1 แร่ควอตซ์ (SiO_2) บริษัท เอส.เอ.พี. เหมือนแร่ จำกัด
- 3.1.2 ทรายแก้ว (SiO_2) บริษัท เอส.เอ.พี. เหมือนแร่ จำกัด
- 3.1.3 โดโลไมต์ ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) บริษัท บางกอกก๊กลาส จำกัด
- 3.1.4 เฟลด์สปาร์ ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) บริษัท บางกอกก๊กลาส จำกัด
- 3.1.5 หินปูน (CaCO_3) บริษัท บางกอกก๊กลาส จำกัด
- 3.1.6 โซดาแอช (Na_2CO_3) บริษัท บางกอกก๊กลาส จำกัด
- 3.1.7 เศษแก้วโซดาไลม์ บริษัท บางกอกก๊กลาส จำกัด
- 3.1.8 โพแทสเซียมไนเตรต (KNO_3)
- 3.1.9 เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) บริษัท ประการัง จำกัด
- 3.1.10 แบเรียมคาร์บอเนต (BaCO_3) บริษัท Ajax Finechem Pty Ltd
- 3.1.11 ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) บริษัท Carlo erba
- 3.1.12 เซอร์โคเนียมไดออกไซด์ (ZrO_2) บริษัท BDH Chemicals Ltd
- 3.1.13 โครเมียมออกไซด์ (Cr_2O_3)

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- 3.2.1 ตะแกรงร่อนเบอร์ 32 35 48 100 200 mesh (ขนาด 500 425 300 150 75 ไมโครเมตร)
- 3.2.2 เตอบ
- 3.2.3 ถาดอะลูมิเนียม
- 3.2.4 ช้อนตักสาร
- 3.2.5 โปรแกรม Glass cal
- 3.2.6 เครื่องชั่งความละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง
- 3.2.7 เบ้าอะลูมินา

- 3.2.8 เตาลอมแก้ว
- 3.2.9 เตอบนแก้ว
- 3.2.10 เครื่องตัดแก้ว
- 3.2.11 เครื่องขัดแก้ว
- 3.2.12 แผ่นซิลิกอนคาร์ไบด์ 70 45 15 และ 6 ไมโครเมตร
- 3.2.13 แผ่นสักหลาด
- 3.2.14 เวย์เรียคาลิปเปอร์
- 3.2.15 หมวกป้องกันความร้อน
- 3.2.16 ถุงมือป้องกันความร้อน
- 3.2.17 เครื่อง X-ray Diffractometer (XRD) (Bruker, D8 Advance)
- 3.2.18 เครื่อง DSC/TG (Netzsch STA 449 F3 Jupiter)
- 3.2.19 เครื่อง X-Ray Fluorescence Spectrometer (S8 Tiger, Bruker)
- 3.2.20 เครื่อง Dilatometer (NETZSCH DIL 402 PC)
- 3.2.21 เครื่อง UV-VIS Spectrophotometer (Analytikjena Specord 250)
- 3.2.22 เครื่อง Viscometer Fiber Elongation (BÄHR 402 physical property)

3.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.3.1 ทดสอบวัตถุดิบเบื้องต้น

อบวัตถุดิบ 100 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของแร่ควอตซ์จาก 3 แหล่งคือ ควอตซ์ 1 และควอตซ์ 2 ได้จากเหมืองในพื้นที่จังหวัดกาญจนบุรี และควอตซ์ 3 ได้จากเหมืองในพื้นที่จังหวัดระยอง ทั้งนี้วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของแร่ควอตซ์เพื่อพิจารณาปริมาณซิลิกาและเหล็กโดยพิจารณาให้มีปริมาณซิลิกาใกล้เคียงกับทรายแก้วและพิจารณาปริมาณเหล็กของแร่ควอตซ์ที่น้อยที่สุด เมื่อพิจารณาองค์ประกอบทางเคมีของแร่ควอตซ์ทั้งสาม พบว่าควอตซ์ 3 เหมาะสมในการนำมาใช้ในการทดลองมากที่สุด จากนั้นจึงวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบที่จะใช้ทดลองทั้งหมดได้แก่ ทรายแก้ว โดโลไมต์ เฟลด์สปาร์ หินปูน โซดาแอส เศษแก้ว โพแทสเซียมไนเตรต เหล็กออกไซด์ แบริยมคาร์บอเนต ไทเทเนียมไดออกไซด์ เซอร์โคเนียมไดออกไซด์ โครเมียมออกไซด์ ด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence Spectrometer (XRF) โดยอาศัยหลักการคือเมื่อรังสีเอ็กซ์จากเครื่องจะถูกส่งไปยังชิ้นงานตัวอย่าง ทำให้ชิ้นงานเกิดการปล่อย photon ออกมา (fluoresced) เนื่องจาก photon ที่ถูกปล่อยออกมามากจากธาตุต่างชนิดในชิ้นงานจะมีความ

ยาวคลื่นและพลังงานต่างกันและปริมาณของ photon ที่เปล่งออกมาจะขึ้นอยู่กับปริมาณของธาตุนั้น ในสารนั้นๆทำให้ทราบถึงธาตุชนิดนั้นๆ

จากนั้นเมื่อได้ทราบและแร่ควอตซ์3 แล้วจึงนำมาวิเคราะห์ความเป็นผลึกของแร่ควอตซ์3 และทราบด้วยเครื่อง X-ray Diffractometer (XRD) โดยอาศัยหลักการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ทราบค่าความยาวคลื่น โดยอาศัยหลักการของ Bragg's law ในการคำนวณค่าการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ เมื่อรังสีเอ็กซ์ถูกยิงไปยังวัสดุที่มีผลึกจะเกิดการเลี้ยวเบนที่มุมต่างๆ โดยจะมี Detector รับความเข้มของรังสีเอ็กซ์ ที่เกิดจากการเลี้ยวเบนในมุมต่างๆ ในการทดลองใช้ค่า 2θ ในช่วง 10-80 องศา

3.3.2 ศึกษาขนาดของแร่ควอตซ์และทรายที่ส่งผลต่อการหลอม

3.3.2.1 วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนด้วย Differential Scanning Calorimetry(DSC) and Thermogravimetric Analysis (TGA)

วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของซิลิกา กับหินปูน ซิลิกา กับโซดาแอช เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างกันของการทำปฏิกิริยาระหว่างทรายกับควอตซ์3 โดยใช้เครื่อง DSC/TG โดยอาศัยหลักการดังนี้ตัวอย่างจะถูกวิเคราะห์พร้อมกับวัสดุอ้างอิง โดยการเพิ่มอุณหภูมิในอัตราคงที่ แล้ววัดความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างตัวอย่างและวัสดุอ้างอิง เมื่อตัวอย่างได้รับความร้อนอาจจะเกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะ ทางโครงสร้างและทางเคมีจะแสดงออกมาเป็นกราฟของการดูดความร้อนหรือคายความร้อน TGA เป็นเครื่องมือที่ใช้ให้ความร้อนด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิคงที่ ในบรรยากาศที่ควบคุม น้ำหนักของตัวอย่างจะมีการชั่งอย่างต่อเนื่อง ด้วยเครื่องชั่งที่มีความละเอียดสูง

3.3.2.2 คำนวณวัตถุดิบด้วยโปรแกรม glass cal

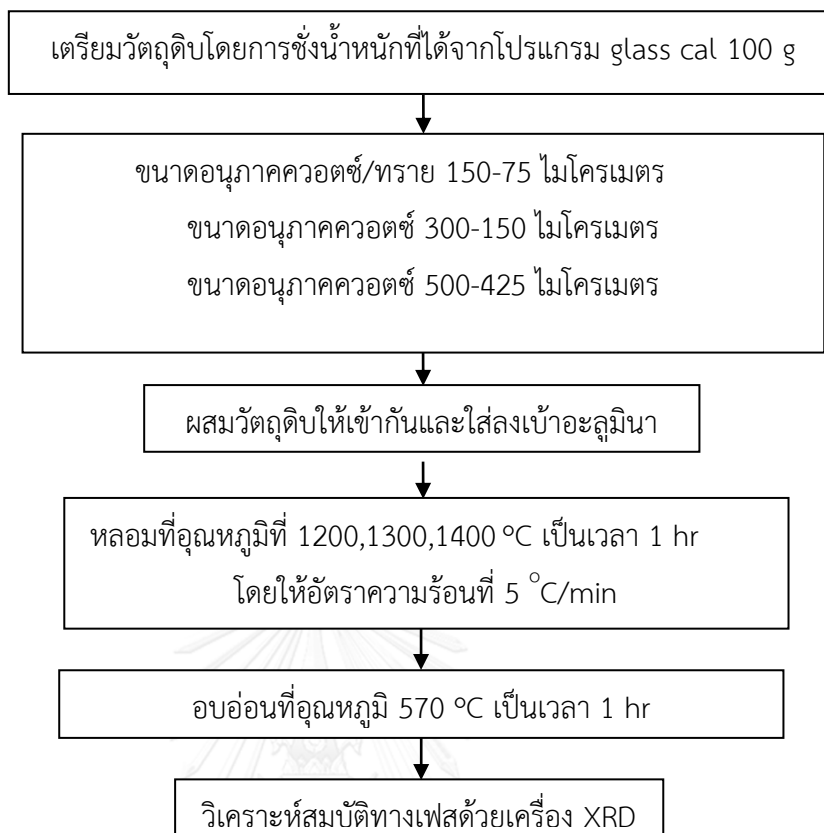
โปรแกรม glass cal คือโปรแกรมที่ใช้คำนวณน้ำหนักวัตถุดิบที่ต้องใช้ในการหลอมแก้ว โดยโปรแกรม glass cal จะคำนวณออกไซด์ของวัตถุดิบที่ได้เปรียบเทียบกับสูตรและคำนวณออกมาเป็นน้ำหนักของวัตถุดิบที่ต้องใช้ในการทดลอง เบื้องต้นนำผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและสูตรแก้วใส่ลงโปรแกรม glass cal โดยสูตรที่ใช้คือ SiO_2 62 wt% Na_2CO_3 22 wt% และ CaCO_3 16 wt% จากนั้นโปรแกรม glass cal จะคำนวณออกไซด์ของวัตถุดิบที่ได้เปรียบเทียบกับสูตรและคำนวณออกมาเป็นน้ำหนักของวัตถุดิบที่ต้องใช้ในการทดลอง

3.3.2.3 การเตรียมวัตถุดิบและการหลอมแก้ว

เตรียมวัตถุดิบโดยชั่งน้ำหนักควอตซ์3 และทราย (SiO_2) 62 wt% โซดาแอช (Na_2CO_3) 22 wt% หินปูน (CaCO_3) 16 wt% ที่ได้จากโปรแกรม glass cal ดังแสดงในตารางที่ 3.1 ทั้งนี้ได้แบ่งขนาดควอตซ์3 เป็นสามช่วงขนาด ขนาดเล็ก 150-75 ไมโครเมตร ขนาดกลาง 300-150 ไมโครเมตร ขนาดใหญ่ 500-425 ไมโครเมตรและทรายแก้วที่ช่วงขนาด 150-75 ไมโครเมตร โดยทำการคัดขนาดอนุภาคผ่านตะแกรงร่อนตั้งแต่เบอร์ 32 35 48 100 และ 200 mesh จากนั้นผสมวัตถุดิบให้เข้ากัน แล้วนำใส่ในเบ้าอะลูมินา นำเข้าเตาหลอมและหลอมที่อุณหภูมิ 1200 1300 1400 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ให้อัตราความร้อนที่ 5 °C/min จากนั้นนำมาบอ่อนที่อุณหภูมิ 570 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

ตารางที่ 3.1 ปริมาณวัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง

วัตถุดิบ	ทราย (กรัม)	ควอตซ์3 (กรัม)
ซิลิกา (SiO_2)	50.6378	50.6812
หินปูน (CaCO_3)	22.7066	22.7330
โซดาแอช (Na_2CO_3)	26.6556	26.5858



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการหลอมแก้วในการทดลองที่ 3.3.2

3.3.2.4 วิเคราะห์องค์ประกอบของเฟส

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสเพื่อศึกษาเฟสที่เปลี่ยนแปลงไปของการหลอมตัวของวัตถุดิบของช่วงขนาดอนุภาคต่างๆของทรายและควอตซ์3 ที่ช่วงอุณหภูมิ 1200-1400 °C ด้วยเครื่อง X-ray Diffractometer (XRD)

3.3.3 ศึกษาคุณสมบัติของแก้วโซดาไลม์สีเขียวที่ใช้แร่ควอตซ์เปรียบเทียบกับแก้วโซดาไลม์สีเขียวที่ใช้ทรายแก้ว

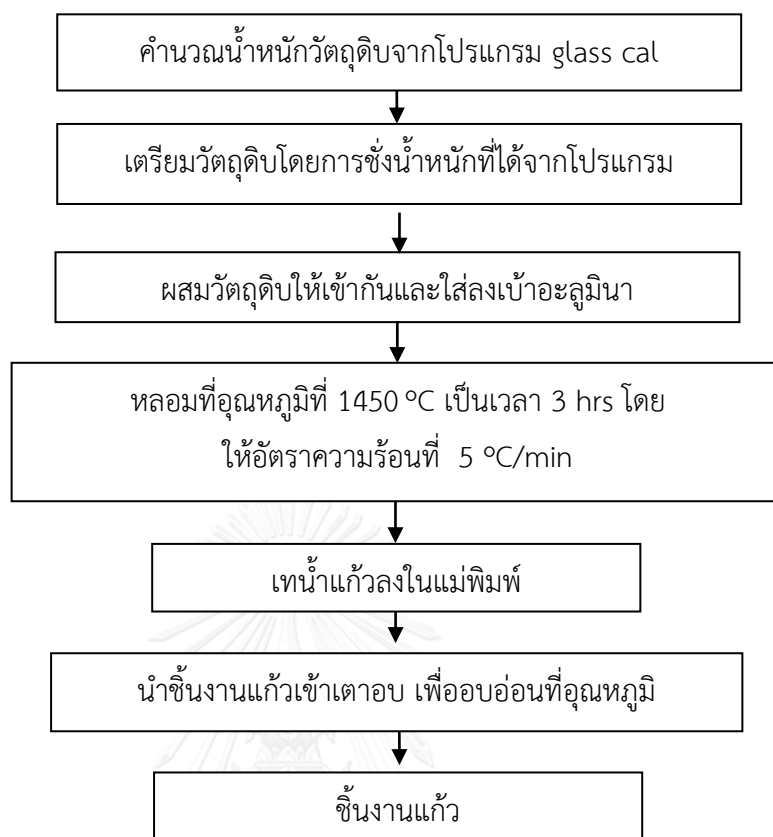
3.3.3.1 การเตรียมแก้วโซดาไลม์สีเขียว

เบื้องต้นได้นำขวดโซดาไลม์สีเขียวมาตัดและขัด จากนั้นนำมาหาองค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence Spectrometer ทดสอบสีของขวดโซดาไลม์สีเขียวด้วยเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer ทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง Dilatometer และเครื่อง Viscometer Fiber Elongation การทดสอบในส่วนนี้เพื่อเป็นมาตรฐานในการทดสอบแก้วโซดาไลม์

สีเขียวที่ได้จากทรายและควอตซ์ จากนั้นนำผลการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีที่ได้จากขวดโซดาไลม์สีเขียวใส่ค่าลงในโปรแกรม glass cal จากนั้นเตรียมวัตถุดิบที่ได้จากโปรแกรม glass cal ซึ่งจะแสดงในตารางที่ 3.2 ในการเตรียมวัตถุดิบจะเตรียมสองชุดโดยในชุดแรกจะใช้แร่ควอตซ์เป็นวัตถุดิบและชุดที่สองจะใช้ทรายแก้วเป็นวัตถุดิบ จากนั้นหลอมที่อุณหภูมิ 1450 °C ให้อัตราความร้อนที่ 5 °C/min เมื่ออุณหภูมิถึง 1450 °C คงอุณหภูมิไว้เป็นเวลา 3 ชั่วโมง หลังจากนั้นเทน้ำแก้วลงแม่พิมพ์ (ก่อนเทน้ำแก้วลงแม่พิมพ์ แม่พิมพ์จะถูกให้ความร้อนด้วยเตาให้ความร้อนก่อน 30 นาที) หลังจากเทน้ำแก้วลงแม่พิมพ์แล้วนำชิ้นงานแก้วออกจากแม่พิมพ์แล้วนำเข้าเตาอบโดยคงอุณหภูมิที่ 570 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นเอาออกจากเตาอบแล้วนำไปทดสอบในขั้นถัดไป

ตารางที่ 3.2 ปริมาณวัตถุดิบที่ใช้ในการทดลองแก้วโซดาไลม์สีเขียว

วัตถุดิบ	ทราย (กรัม)	ควอตซ์ (กรัม)
ซิลิกา (SiO ₂)	55.0868	54.9882
หินปูน (CaCO ₃)	11.9753	11.9257
เฟลด์สปาร์ (NaAlSi ₃ O ₈)	9.1451	9.3023
โดโลไมต์ (CaMg(CO ₃) ₂)	5.8854	5.8916
โซดาแอช (Na ₂ CO ₃)	16.4105	16.4300
โครเมียมออกไซด์ (Cr ₂ O ₃)	0.1582	0.1584
แบเรียมคาร์บอเนต (BaCO ₃)	0.2008	0.1891
เหล็กออกไซด์ (Fe ₂ O ₃)	0.2459	0.1909
โพแทสเซียมไนเตรต (KNO ₃)	0.8575	0.8599
ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO ₂)	-	0.0294
เซอร์โคเนียมไดออกไซด์ (ZrO ₂)	0.0345	0.0345



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการหลอมแก้วในการทดลองที่ 3.3.3

3.3.3.2 วิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วย X-ray fluorescence

วิเคราะห์หาปริมาณธาตุของแก้วที่ได้มาจากทรายและควอตซ์ เพื่อเปรียบเทียบองค์ประกอบเคมีของแก้วที่ได้จากทราย แก้วที่ได้จากควอตซ์และขวดแก้ว ด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence Spectrometer (XRF)

3.3.3.3 วิเคราะห์ค่าสีในระบบ CIE L*a*b

วิเคราะห์สีของชิ้นงานแก้วที่ได้จากทรายและควอตซ์ เพื่อเปรียบเทียบค่าสีของแก้วที่ได้จากทราย แก้วที่ได้จากควอตซ์และขวดแก้ว ด้วยเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer โดยวัดสีในระบบ CIE L*a*b* (1967) หลักการทำงานของเครื่องจะอาศัยหลักการดูดกลืนรังสีของสารที่อยู่ในช่วงรังสียูวีและแสงสีขาวย สารแต่ละชนิดจะดูดกลืนรังสีในช่วงความยาวคลื่นที่แตกต่างกันและปริมาณการดูดกลืนรังสีก็ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารนั้น ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นสารอินทรีย์ สารประกอบเชิงซ้อนและ

สารอินทรีย์ที่สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นเหล่านี้ได้ การดูดกลืนแสงของสารต่างๆเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของสารตามกฎของBeer-Lambert

3.3.3.4 วิเคราะห์สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน Dilatometer

วิเคราะห์สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของชิ้นงานแก้วที่ได้จากทรายและควอตซ์ เพื่อเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน ของแก้วที่ได้จากขวดแก้ว ด้วยเครื่อง Dilatometer โดยจะวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของแก้วในช่วงอุณหภูมิ 50-300 °C โดยเครื่อง Dilatometer จะวัดความแตกต่างของความยาวหรือปริมาตรของชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป 1 K เมื่อเทียบกับความยาวหรือปริมาตรเริ่มต้น โดยทั่วไปสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\alpha = \Delta L / (L_0 \Delta T)$$

โดยที่ α คือสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน, ΔT คืออุณหภูมิห้องที่เปลี่ยนแปลงไป, L_0 คือ ความยาวของชิ้นงานที่อุณหภูมิห้อง, ΔL คือ ความยาวของชิ้นงานที่อุณหภูมิสูงสุด

3.3.3.5 วิเคราะห์ความหนืดของแก้ว Viscometer Fiber Elongation

วิเคราะห์ความหนืดของชิ้นงานแก้วที่ได้จากทรายและควอตซ์ เพื่อเปรียบเทียบค่า กับแก้วที่ได้ขวดแก้วด้วยเครื่อง Viscometer Fiber Elongation ซึ่งจะแสดงในรูปที่ 3.7 โดยให้อัตราความร้อนที่ 5 °C/min เครื่อง Viscometer Fiber Elongation เป็นเครื่องที่ใช้วัดหาอุณหภูมิที่จุดความหนืดต่างๆ สามารถคำนวณได้จากสมการ

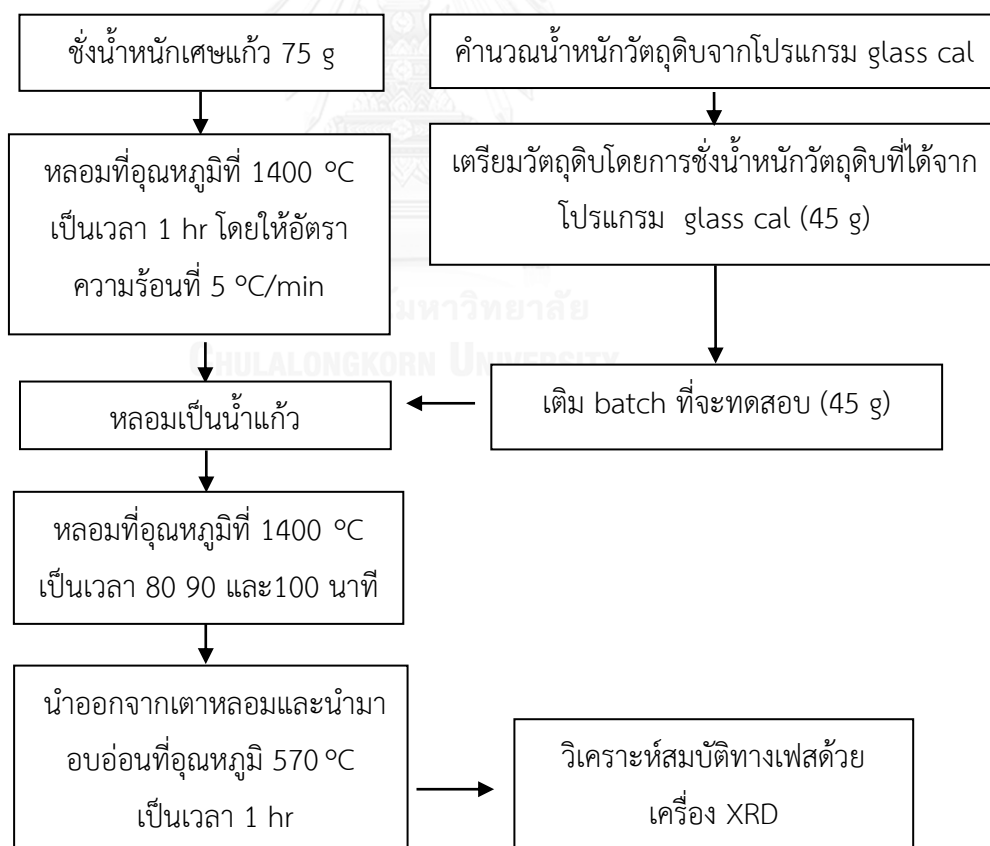
$$\eta = \frac{LF}{3A(dL/dt)}$$

L คือความยาวของ fiber, F คือแรงที่กระทำต่อ fiber, A คือพื้นที่หน้าตัด, (dL/dt) คือความยาวที่เปลี่ยนแปลงไป

3.3.4 การทดสอบการหลอมตัวของวัสดุบิแก้วด้วยวิธี Batch-Free Time

3.3.4.1 การเตรียมทดสอบด้วยวิธี Batch-Free Time

การทดสอบการหลอมตัวของวัสดุบิแก้วด้วยวิธี Batch-Free Time เป็นการทดสอบความสามารถในการหลอมตัวของ batch ในน้ำแก้วเมื่อระยะเวลาแตกต่างกัน เบื้องต้นได้ทำการชั่งน้ำหนักวัสดุบิ 45 กรัม ตามตารางที่ 3.2 จากนั้นทำการหลอมเศษแก้ว ปริมาณ 75 กรัม ใส่ในเบ้าแล้วหลอมให้เป็นน้ำแก้วที่อุณหภูมิ 1400 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำแต่ละ batch ปริมาณ 45 กรัม ที่ต้องการทดสอบเติมลงไป จับเวลา 80 90 และ 100 นาที จากนั้นนำออกจากเตาหลอมและนำมาอบที่อุณหภูมิ 570 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นปล่อยให้เย็นตัวในเตาอบแล้วนำเบ้าที่ได้มาตรวจสอบความสมบูรณ์ของการหลอม โดยดูจากผิวด้านบนของแก้ว การหลอมตัวของ batch จะแปรผันตามระยะเวลาที่อยู่ในเตาหลอม ระยะเวลาที่เหมาะสมคือได้เนื้อแก้วใสซึ่งจะแสดงให้เห็นว่า batch ที่เติมลงไปทั้งหมดหลอมตัวอย่างสมบูรณ์กลายเป็นเนื้อเดียวกับแก้ว และตรวจสอบส่วนผสมของ batch ที่หลอมตัวไม่สมบูรณ์ โดยการตัดผิวหน้าที่ยังไม่หลอมมาตรวจสอบด้วย X-ray Diffraction (XRD)



รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการทดลองการหลอมตัวของวัสดุบิแก้วด้วยวิธี Batch-Free Time ในการทดลองที่ 3.3.4

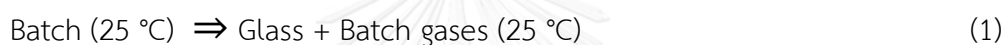
3.3.4.2 วิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสของวัสดุที่หลอมตัวไม่หมด

วิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสของวัสดุที่หลอมตัวไม่หมดบนผิวหน้าของแก้วที่ทดสอบ Batch-Free Time โดยวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสของแก้วที่ได้จากทรายและ ควอตซ์ที่ถูกล้อมที่อุณหภูมิ 1400 °C เป็นเวลา 80 90 และ 100 นาทีด้วยเครื่อง X-ray Diffractometer (XRD) (Bruker, D8 Advance)

3.3.5 การคำนวณค่าพลังงานทางเทอร์โมไดนามิกส์

ค่าพลังงานทางทฤษฎีที่วัสดุแก้วต้องการใช้สำหรับการเปลี่ยนแปลงจากวัสดุไปเป็นเนื้อแก้ว คือ exploited heat, H_{ex} สามารถคำนวณได้จากสองส่วนคือ

1. ค่าพลังงานทางเคมี ΔH_{chem}° ในการเปลี่ยนวัสดุแก้ว (batch) ไปเป็น เนื้อแก้วและแก๊สที่อุณหภูมิห้อง



$$\Delta H_{chem}^{\circ} \Rightarrow H_{(glass)}^{\circ} + H_{(gas)}^{\circ} - H_{(batch)}^{\circ} \quad (2)$$

2. ค่าพลังงานที่ทำให้เนื้อแก้วอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิห้องถึงอุณหภูมิการหลอม $\Delta H_{T(glass)}$, T อุณหภูมิหลอมตัวของแก้ว

$$H_{ex} \Rightarrow \Delta H_{chem}^{\circ} + \Delta H_{T(glass)} \quad (3)$$

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

4.1 ผลการวิเคราะห์วัตถุดิบของทรายและควอตซ์ในเบื้องต้น

4.1.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของทรายและควอตซ์ด้วย X-ray fluorescence

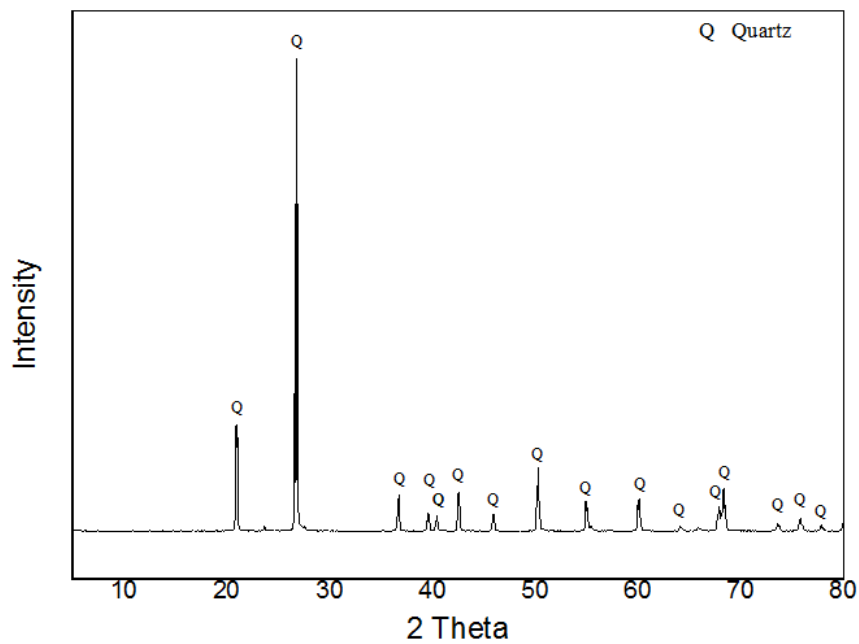
ในเบื้องต้นได้ทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของทรายและควอตซ์ จากตารางที่ 4.1 พบว่าทรายจะมีองค์ประกอบของซิลิการ้อยละ 98 โดยน้ำหนัก เหล็กออกไซด์ร้อยละ 0.07 โดยน้ำหนัก ควอตซ์1 มีองค์ประกอบของซิลิการ้อยละ 88.88 โดยน้ำหนัก เหล็กออกไซด์ร้อยละ 2.21 โดยน้ำหนัก ควอตซ์2 มีองค์ประกอบของซิลิการ้อยละ 87.00 โดยน้ำหนัก เหล็กออกไซด์ร้อยละ 2.41 โดยน้ำหนัก ควอตซ์3 มีองค์ประกอบของซิลิการ้อยละ 99.02 โดยน้ำหนัก เหล็กออกไซด์ร้อยละ 0.17 โดยน้ำหนัก ในการทดสอบครั้งนี้พบว่าควอตซ์3 มีองค์ประกอบของซิลิกาที่ใกล้เคียงกับทราย และมีองค์ประกอบของเหล็กน้อยที่สุดในงานวิจัยจึงนำควอตซ์3 มาใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของทรายและควอตซ์

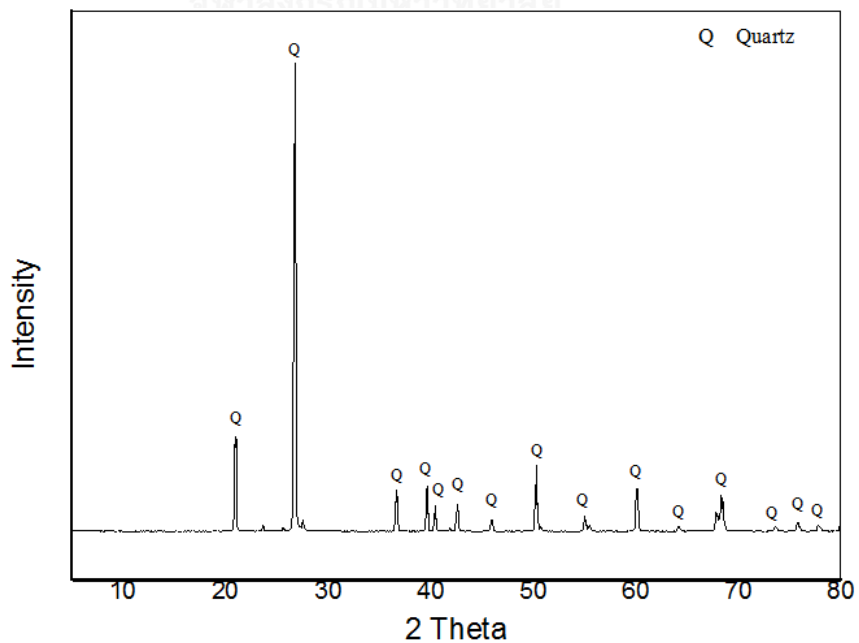
องค์ประกอบ	ทราย	ควอตซ์1	ควอตซ์2	ควอตซ์3
	ปริมาณ(ร้อยละโดยน้ำหนัก)			
Na ₂ O	0.16	0.69	0.61	0.10
MgO	-	0.35	0.43	-
Al ₂ O ₃	0.43	4.73	6.06	0.38
SiO ₂	98.92	88.88	87.00	99.02
P ₂ O ₅	-	0.04	0.08	-
SO ₃	0.05	0.06	-	-
K ₂ O	0.12	1.38	1.73	0.11
CaO	0.02	0.19	0.22	0.08
TiO ₂	0.07	0.19	0.23	-
Fe ₂ O ₃	0.07	2.21	2.41	0.17
ZrO ₂	-	0.02	0.03	-
BaO	-	0.05	0.03	0.02
MnO	-	0.04	-	-
LOI	0.16	1.17	1.17	0.12

4.1.2 ผลการวิเคราะห์หึ่งค์ประกอบทางเฟสของทรายและควอตซ์ด้วย X-ray Diffractometer

หลังจากทดสอบองค์ประกอบทางเคมีในเบื้องต้นได้ทดสอบองค์ประกอบทางเฟสของทรายและควอตซ์3 พบว่าองค์ประกอบทางเฟสของทรายและควอตซ์3 คือผลึกของ Quartz โดยองค์ประกอบทางเฟสของทรายจะแสดงในรูปที่ 4.1 และองค์ประกอบทางเฟสของควอตซ์3 จะแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.1 องค์ประกอบทางเฟสของทราย



รูปที่ 4.2 องค์ประกอบทางเฟสของควอตซ์

4.1.3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบที่ใช้ในการทดลองด้วย X-ray fluorescence

ตารางที่ 4.2 แสดงผลจากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง ในส่วนนี้ซึ่งประกอบไปด้วย หินปูน โซดาแอช ทราาย ควอตซ์ เฟลด์สปาร์ แบเรียมคาร์บอเนต โพแทสเซียมไนเตรต ไทเทเนียมไดออกไซด์ เซอร์โคเนียมไดออกไซด์และโดโลไมต์

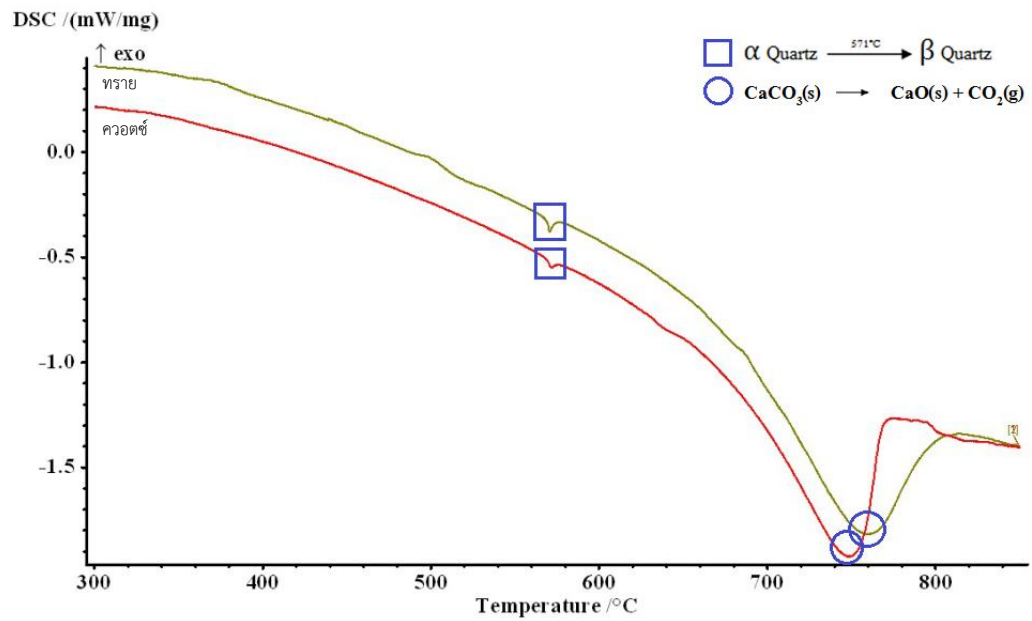
ตารางที่ 4.2 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง

	CaCO ₃	Na ₂ CO ₃	NaAlSi ₃ O ₈	BaCO ₃	KNO ₃	TiO ₂	ZrO ₂	CaMg(CO ₃) ₂
องค์ประกอบ	ปริมาณ(ร้อยละโดยน้ำหนัก)							
Na ₂ O	-	66.07	8.26	-	0.21	0.04	-	0.08
MgO	0.28	0.11	0.08	-	-	-	-	17.44
Al ₂ O ₃	0.14	0.09	19.13	-	-	-	-	0.10
SiO ₂	0.30	0.48	66.68	-	-	-	0.07	0.18
P ₂ O ₅	-	0.27	0.45	-	-	0.43	-	-
SO ₃	-	0.04	-	-	0.06	0.06	-	0.02
K ₂ O	56.81	0.12	3.31	-	43.62	0.31	-	-
CaO	-	-	1.47	-	-	-	-	36.00
TiO ₂	0.057	0.04	0.24	-	-	99.12	0.08	-
Fe ₂ O ₃			0.28	-	-	0.01	0.01	0.06
BaO			0.04	99.20	-			-
ZrO ₂	-	-	-	-	-	0.03	99.84	-
LOI	42.41	32.77	0.06	0.80	56.11	-	-	46.13

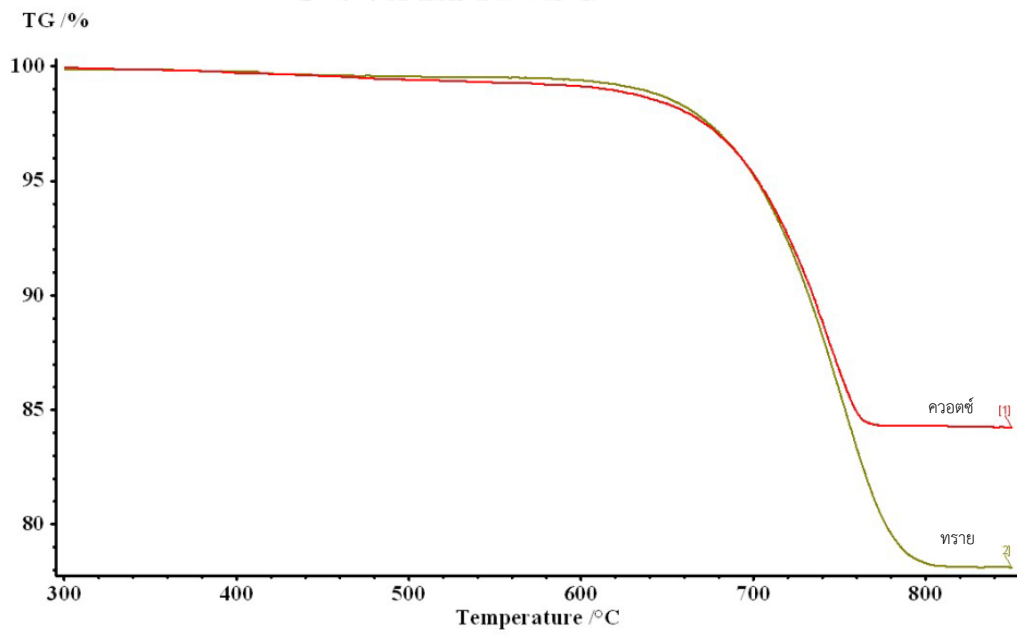
4.2 การวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของแร่ควอตซ์ที่ส่งผลต่อการหลอม

4.2.1 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนด้วย DSC/TGA

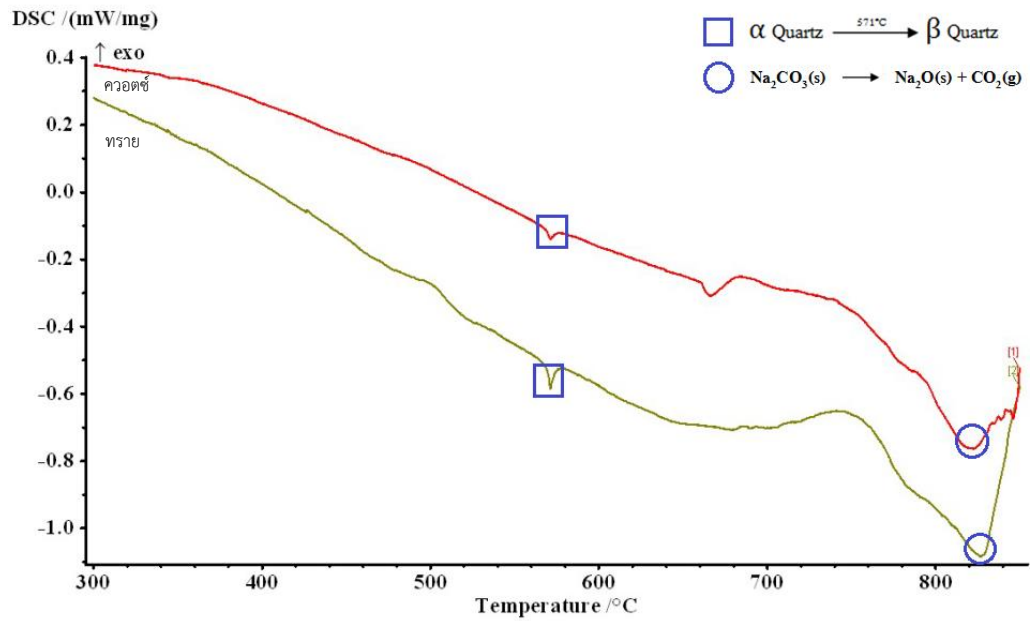
การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อน แบ่งการทดลองเป็นซิลิกากับหินปูนซึ่งจะแสดงในรูปที่ 4.3 และ 4.4 ซิลิกากับโซดาแอชจะแสดงในรูปที่ 4.5 และ 4.6 ในการทดลองใช้ควอตซ์และทรายเป็นแหล่งให้ซิลิกา ผลการวิเคราะห์ DSC ของทรายกับหินปูนพบว่าที่อุณหภูมิ 570.8 °C เกิดการเปลี่ยนเฟสของ Quartz จาก α Quartz ไปเป็น β Quartz และที่อุณหภูมิ 759.5 °C เกิดการสลายตัวของหินปูน ผลของควอตซ์กับหินปูนพบว่าที่อุณหภูมิ 571.8 °C เกิดการเปลี่ยนเฟสของ Quartz จาก α Quartz ไปเป็น β Quartz และที่อุณหภูมิ 748.6 °C เกิดการสลายตัวของหินปูน ผลการวิเคราะห์ DSC ของทรายกับโซดาแอชพบว่าที่อุณหภูมิ 571.3 °C เกิดการเปลี่ยนเฟสของ Quartz จาก α Quartz ไปเป็น β Quartz และที่อุณหภูมิ 827 °C เกิดการสลายตัวของโซดาแอช ผลของควอตซ์กับโซดาแอชพบว่าที่อุณหภูมิ 571.3 °C เกิดการเปลี่ยนเฟสของ Quartz จาก α Quartz ไปเป็น β Quartz และที่อุณหภูมิ 822.5 °C เกิดการสลายตัวของโซดาแอช ผลการวิเคราะห์ TGA ของทรายกับหินปูนพบว่าที่อุณหภูมิประมาณ 640 ถึง 800 °C น้ำหนักของสารเริ่มลดลงเนื่องจากการสลายตัวของหินปูน ผลของควอตซ์กับหินปูนพบว่าที่อุณหภูมิประมาณ 640 ถึง 770 °C น้ำหนักของสารเริ่มลดลงเนื่องจากการสลายตัวของหินปูน ผลของทรายกับโซดาแอชและ ควอตซ์กับโซดาแอชพบว่าที่อุณหภูมิประมาณ 680 °C น้ำหนักของสารเริ่มลดลงเนื่องจากการสลายตัวของโซดาแอช การทดลองเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Sheckler, C. A. และคณะ^[55] ได้ผลที่ใกล้เคียงกัน



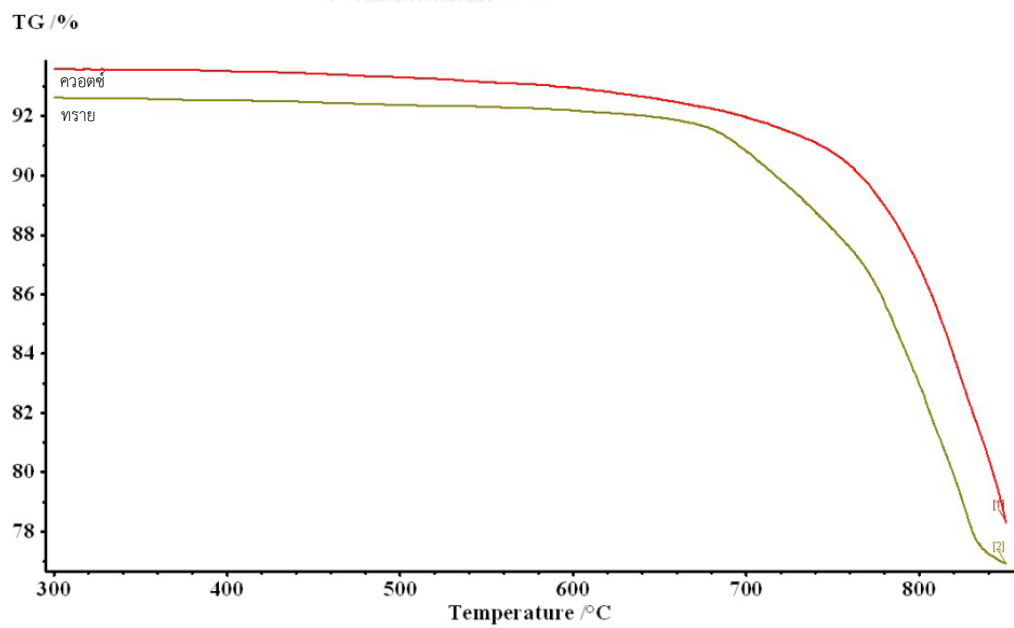
รูปที่ 4.3 กราฟ DSC ของซิลิกา กับหินปูน (ทรายเส้นสีเขียวและควอตซ์เส้นสีแดง)



รูปที่ 4.4 กราฟ TGA ของซิลิกา กับหินปูน (ทรายเส้นสีเขียวและควอตซ์เส้นสีแดง)



รูปที่ 4.5 กราฟ DSC ของซิลิกา กับ โซดาแอช (ทรายเส้นสีเขียวและควอตซ์เส้นสีแดง)

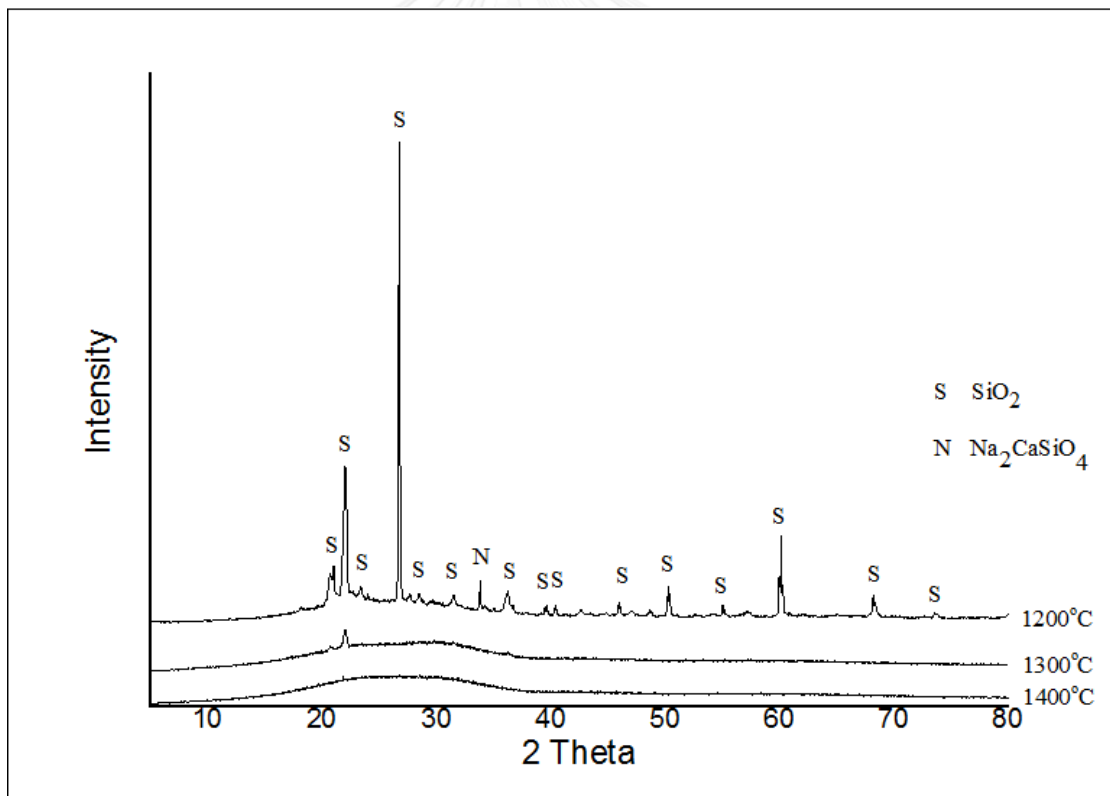


รูปที่ 4.6 กราฟ TGA ของซิลิกา กับ โซดาแอช (ทรายเส้นสีเขียวและควอตซ์เส้นสีแดง)

4.4.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของเฟสด้วย X-ray Diffractometre

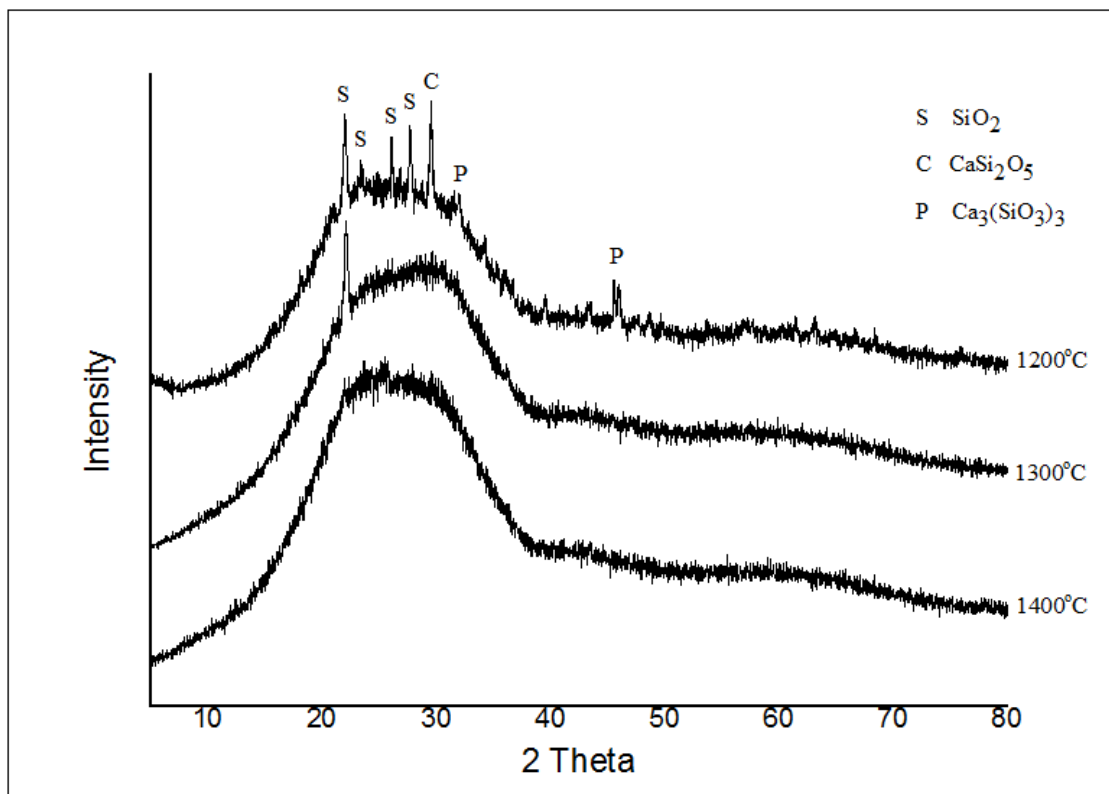
หลอมแก้วที่อุณหภูมิ 1200-1400 °C โดยใช้วัตถุดิบที่มีขนาดอนุภาคสามช่วงขนาดของควอตซ์และใช้ทรายที่ช่วงอนุภาคขนาดเล็ก จากนั้นวิเคราะห์องค์ประกอบของเฟสเพื่อพิสูจน์การหลอมของวัตถุดิบ

จากรูปที่ 4.7 แก้วที่ใช้ควอตซ์อนุภาคขนาดใหญ่ (500-425 ไมโครเมตร) ถูกหลอมที่อุณหภูมิ 1200 1300 และ 1400 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงพบว่าที่อุณหภูมิ 1200 °C พบเฟสของ SiO_2 และ $\text{Na}_2\text{CaSiO}_4$ เมื่อให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 1300 °C เฟสของ $\text{Na}_2\text{CaSiO}_4$ ถูกหลอมเหลือเพียงแค่ว่าเฟสของ SiO_2 และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิขึ้นเป็น 1400 °C เฟสของ SiO_2 ถูกหลอมจนหมดเหลือเพียงเฟสออสซิลาน จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าแก้วที่ใช้ควอตซ์อนุภาคขนาดใหญ่จะหลอมตัวหมดที่อุณหภูมิ 1400 °C



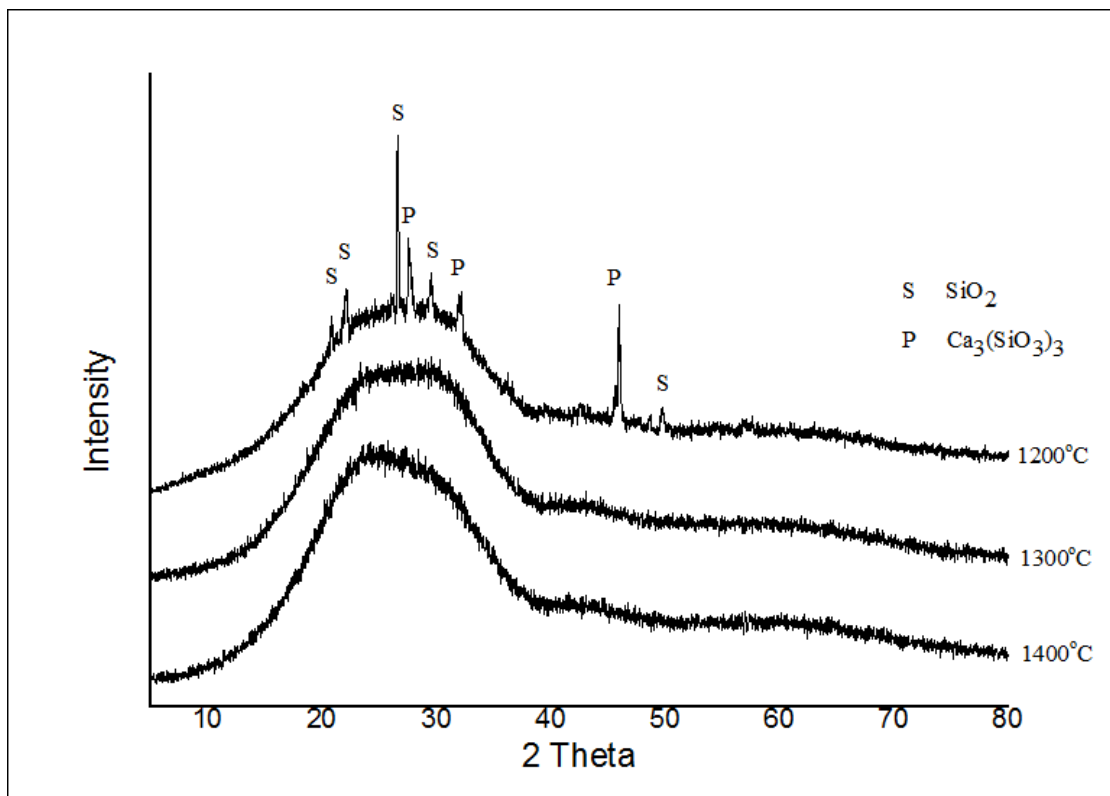
รูปที่ 4.7 องค์ประกอบทางเฟสของแก้วที่ใช้อนุภาคควอตซ์ขนาดใหญ่หลอมที่อุณหภูมิ 1200-1400 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

จากรูปที่ 4.8 แก้วที่ใช้ควอตซ์อนุภาคขนาดกลาง (300-150 ไมโครเมตร) ถูกหลอมที่อุณหภูมิ 1200 1300 และ 1400 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงพบว่าที่อุณหภูมิ 1200 °C พบเฟสของ SiO_2 CaSi_2O_5 และ $\text{Ca}_3(\text{SiO}_3)_3$ เมื่อให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 1300 °C เฟสของ CaSi_2O_5 และ $\text{Ca}_3(\text{SiO}_3)_3$ ถูกหลอมเหลือเพียงแคเฟสของ SiO_2 และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิขึ้นเป็น 1400 °C เฟสของ SiO_2 ถูกหลอมจนหมดเหลือเพียงเฟสอสัณฐาน จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าแก้วที่ใช้ควอตซ์อนุภาคขนาดกลางที่อุณหภูมิ 1400 °C จะเกิดการหลอมตัวหมด ซึ่งคล้ายกับแก้วที่ใช้ควอตซ์อนุภาคขนาดใหญ่



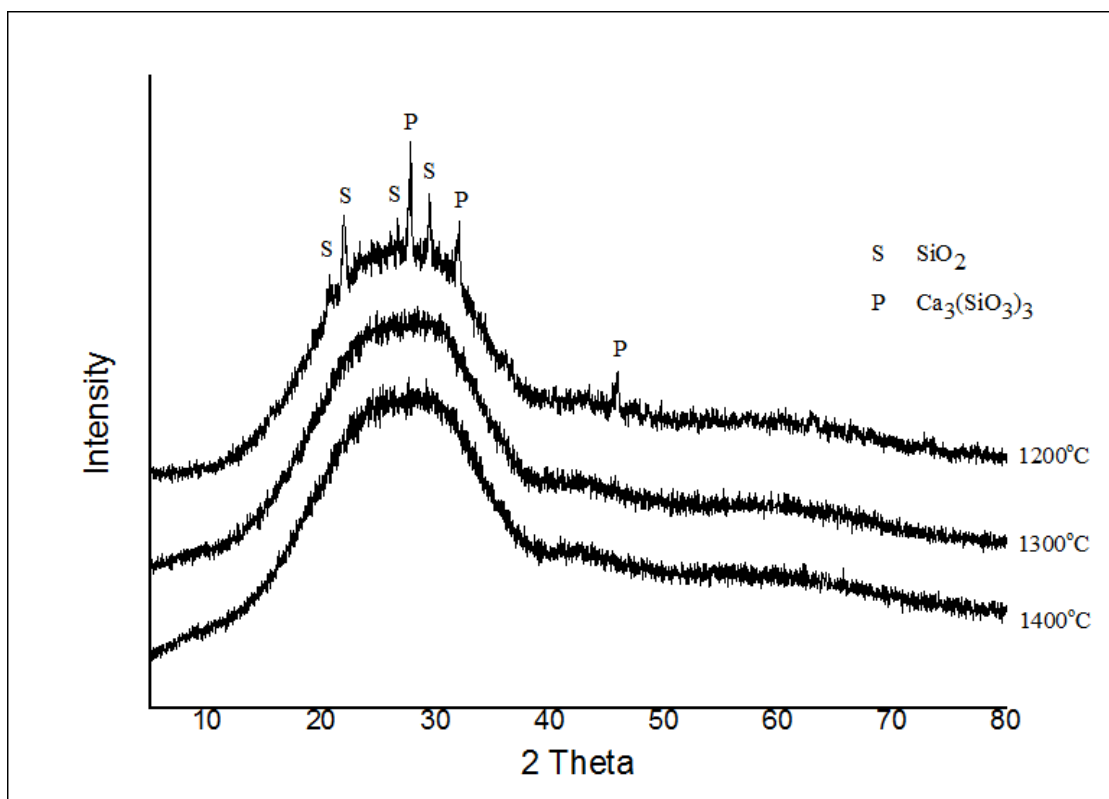
รูปที่ 4.8 องค์ประกอบทางเฟสของแก้วที่ใช้อนุภาคควอตซ์ขนาดกลางหลอมที่อุณหภูมิ 1200-1400 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

จากรูปที่ 4.9 แก้วที่ใช้ควอตซ์อนุภาคขนาดเล็ก (150-75 ไมโครเมตร) ถูกหลอมที่อุณหภูมิ 1200 1300 และ 1400 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงพบว่าที่อุณหภูมิ 1200 °C พบเฟสของ SiO_2 และ $\text{Ca}_3(\text{SiO}_3)_3$ เมื่อให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 1300 °C เฟส SiO_2 และ $\text{Ca}_3(\text{SiO}_3)_3$ ถูกหลอมเหลือเพียงเฟสสัณฐานและเมื่อเพิ่มอุณหภูมิขึ้นเป็น 1400 °C พบเฟสสัณฐานเช่นเดียวกับที่อุณหภูมิ 1300 °C จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าแก้วที่ใช้ควอตซ์อนุภาคขนาดเล็กที่อุณหภูมิ 1300 และ 1400 °C จะเกิดการหลอมตัวหมดและเมื่อเปรียบเทียบกับแก้วที่ใช้ควอตซ์อนุภาคขนาดใหญ่และกลางพบว่าแก้วที่ใช้ควอตซ์อนุภาคขนาดเล็กจะใช้อุณหภูมิในการหลอมที่ต่ำกว่า



รูปที่ 4.9 องค์ประกอบทางเฟสของแก้วที่ใช้อนุภาคควอตซ์ขนาดเล็กหลอมที่อุณหภูมิ 1200-1400 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

จากรูปที่ 4.10 แก้วที่ใช้ทรายที่มีอนุภาคขนาดเท่ากับควอตซ์ที่มีอนุภาคขนาดเล็ก (150-75 ไมโครเมตร) ถูกหลอมที่อุณหภูมิ 1200 1300 และ 1400 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงพบว่าที่อุณหภูมิ 1200 °C พบเฟสของ SiO_2 และ $\text{Ca}_3(\text{SiO}_3)_3$ เช่นเดียวกับแก้วที่ใช้ควอตซ์ขนาดเล็ก เมื่อให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 1300 องศาเซลเซียส เฟส SiO_2 และ $\text{Ca}_3(\text{SiO}_3)_3$ ถูกหลอมเหลือเพียงเฟสสัณฐาน และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิขึ้นเป็น 1400 °C พบเฟสสัณฐานเช่นเดียวกับที่อุณหภูมิ 1300 °C จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าแก้วที่ใช้ทรายที่อุณหภูมิ 1300 และ 1400 °C จะเกิดการหลอมตัวหมดและเมื่อเปรียบเทียบกับแก้วที่ใช้ควอตซ์อนุภาคขนาดเล็กพบว่าทุกอุณหภูมิในการทดลองผลที่ได้เหมือนกัน



รูปที่ 4.10 องค์ประกอบทางเฟสของแก้วที่ใช้ทรายที่ขนาดเล็กหลอมที่อุณหภูมิ 1200-1400 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

4.3 ผลการวิเคราะห์สมบัติของแก้วโซดาไลม์สีเขียวที่ใช้แร่ควอตซ์เปรียบเทียบกับแก้วโซดาไลม์สีเขียวที่ใช้ทรายแก้ว

4.3.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของแก้วโซดาไลม์สีเขียวที่ได้จากการทดลองด้วย X-ray fluorescence

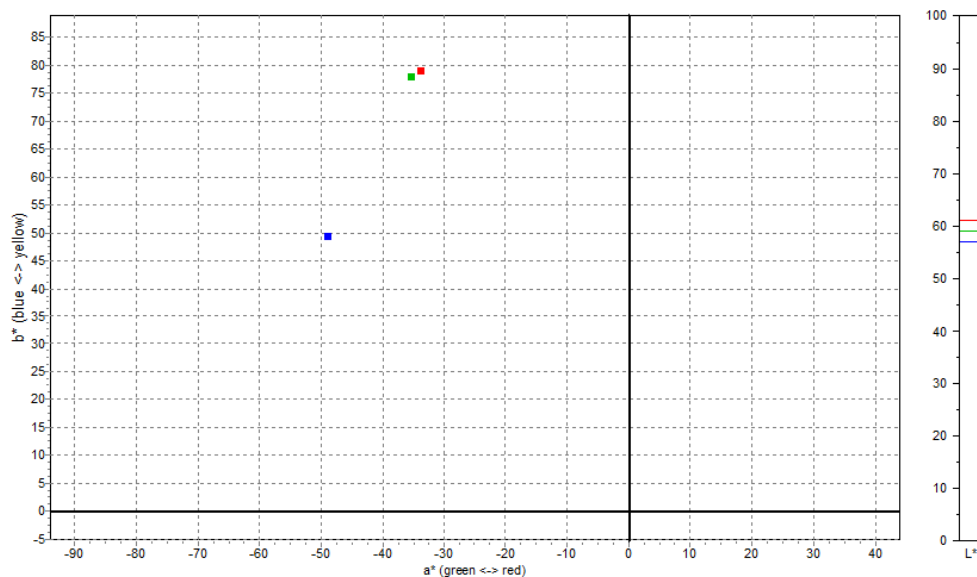
ตารางที่ 4.3 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของขวดแก้วโซดาไลม์สีเขียว แก้วที่ได้จากทรายและแก้วที่ได้จากควอตซ์พบว่าองค์ประกอบทางเคมีของแก้วทั้งสามชนิดมีค่าที่ใกล้เคียงกัน แต่แก้วที่ได้จากทรายและควอตซ์ไม่มีองค์ประกอบของ MnO และ PbO ทั้งนี้คุณสมบัติอาจแตกต่างกันขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีในแก้วซึ่งจะทดสอบในขั้นตอนถัดไป

ตารางที่ 4.3 องค์ประกอบทางเคมีของขวดแก้วโซดาไลม์สีเขียว แก้วที่ใช้ทรายและควอตซ์

องค์ประกอบ	ขวดแก้ว	ทราย	ควอตซ์
	ปริมาณ(ร้อยละโดยน้ำหนัก)		
Na ₂ O	13.54	12.84	12.49
MgO	1.26	1.54	1.78
Al ₂ O ₃	2.35	2.25	2.39
SiO ₂	70.44	71.06	70.74
P ₂ O ₅	0.02	0.04	0.04
SO ₃	0.05	0.04	0.04
K ₂ O	0.87	0.82	0.87
CaO	10.55	10.49	10.92
TiO ₂	0.06	0.09	0.09
Fe ₂ O ₃	0.38	0.35	0.29
ZrO ₂	0.04	0.08	0.03
BaO	0.22	0.23	0.16
Cr ₂ O ₃	0.18	0.17	0.16
MnO	0.02	-	-
PbO	0.03	-	-







4.3.2 ผลการวิเคราะห์ค่าสีในระบบ CIE L*a*b

รูปที่ 4.11 แสดงผลจากการทดสอบค่าสีในระบบ CIE L*a*b ด้วยเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer พบว่าแก้วที่ได้จากทรายและควอตซ์ มีค่าของสีที่ใกล้เคียงกันโดยที่แก้วที่ได้จากควอตซ์มีสีเขียวอ่อนกว่าแก้วที่ได้จากทรายเพียงเล็กน้อยและแก้วที่ได้จากขวดแก้วโซดาไลม์มีสีเขียวมากกว่าแก้วที่ได้จากควอตซ์และทราย ค่าของสีในระบบ CIE L*a*b จะแสดงในตารางที่ 4.4 ทั้งนี้สีที่แตกต่างนี้อาจจะมาจากปริมาณองค์ประกอบทางเคมี Fe_2O_3 Cr_2O_3 และ MnO ของขวดแก้วโซดาไลม์ที่มีมากกว่าแก้วที่ได้จากควอตซ์และทราย อีกทั้งค่าสีที่ต่างกันอาจจะมาจากการฟอกสีแก้ว^[43]



รูปที่ 4.11 ผลการวิเคราะห์ค่าสีในระบบ CIE L*a*b ด้วยเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer แก้วขวดโซดาไลม์ (สีน้ำเงิน) แก้วที่มาจากทราย (สีน้ำเขียว) แก้วที่มาจากควอตซ์ (สีแดง)

ตารางที่ 4.4 ค่าสีในระบบ CIE L*a*b

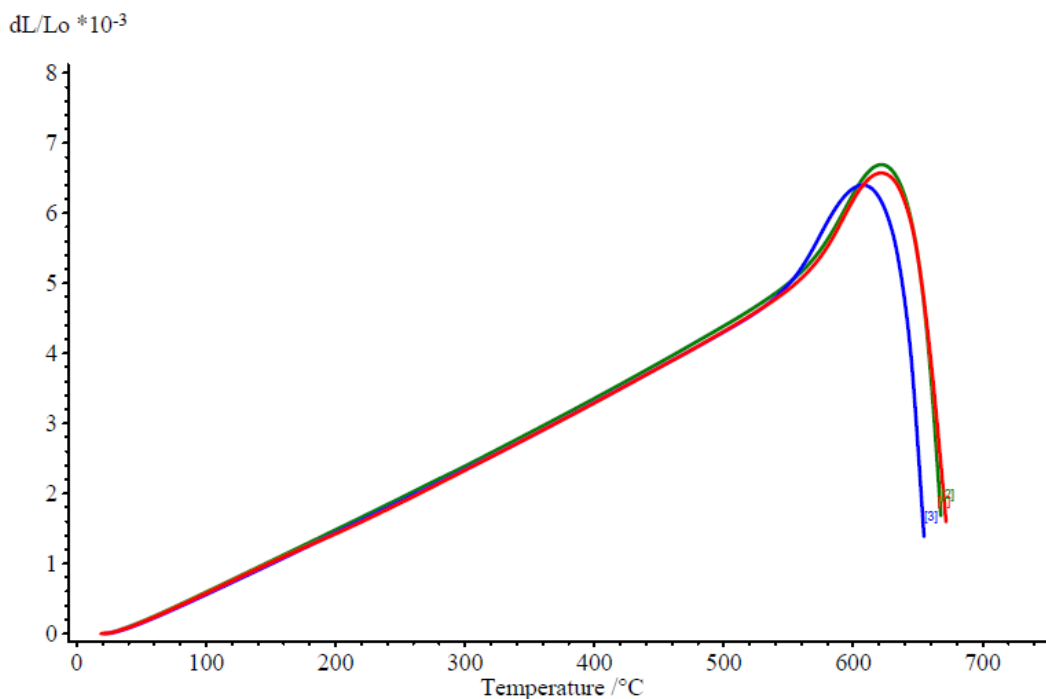
ชื่อชิ้นงาน	สี	รูปจากการทดลอง	L*	a*	b*
ขวดแก้ว			57.08	-48.89	49.30
ทราย			58.95	-35.23	77.86
ควอตซ์			61.04	-33.73	78.93

4.3.3 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง Dilatometer

รูปที่ 4.12 แสดงผลการวิเคราะห์ชิ้นงานแก้วด้วยเครื่อง Dilatometer เพื่อทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน (Coefficient of Thermal Expansion, COE) อุณหภูมิการเปลี่ยนโครงสร้างของแก้ว (T_g) และอุณหภูมิจุดอ่อนตัว ซึ่งจะแสดงในตารางที่ 4.5 พบว่าค่าสมบัติทางความร้อนของแก้วทั้งสามชนิดมีค่าที่ใกล้เคียงกัน โดยสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของขวดแก้วมีค่า $8.77 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ แก้วที่ได้จากทรายมีค่า $8.89 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ และแก้วที่ได้จากควอตซ์มีค่า $8.69 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ อุณหภูมิการเปลี่ยนโครงสร้างของขวดแก้วมีค่า $549.96 \text{ }^{\circ}\text{C}$ แก้วที่ได้จากทรายมีค่า $563.08 \text{ }^{\circ}\text{C}$ และแก้วที่ได้จากควอตซ์มีค่า $566.49 \text{ }^{\circ}\text{C}$ อุณหภูมิจุดอ่อนตัวของขวดแก้วมีค่า $629.01 \text{ }^{\circ}\text{C}$ แก้วที่ได้จากทรายมีค่า $634.76 \text{ }^{\circ}\text{C}$ และแก้วที่ได้จากควอตซ์มีค่า $637.06 \text{ }^{\circ}\text{C}$

ตารางที่ 4.5 ผลจากการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง Dilatometer

ชื่อชิ้นงาน	ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน (50-300 °C)	อุณหภูมิการเปลี่ยนโครงสร้างของแก้ว	อุณหภูมิจุดอ่อนตัว
ขวดแก้ว	$8.77 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	549.96°C	629.01°C
ทราย	$8.89 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	563.08°C	634.76°C
ควอตซ์	$8.69 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	566.49°C	637.06°C

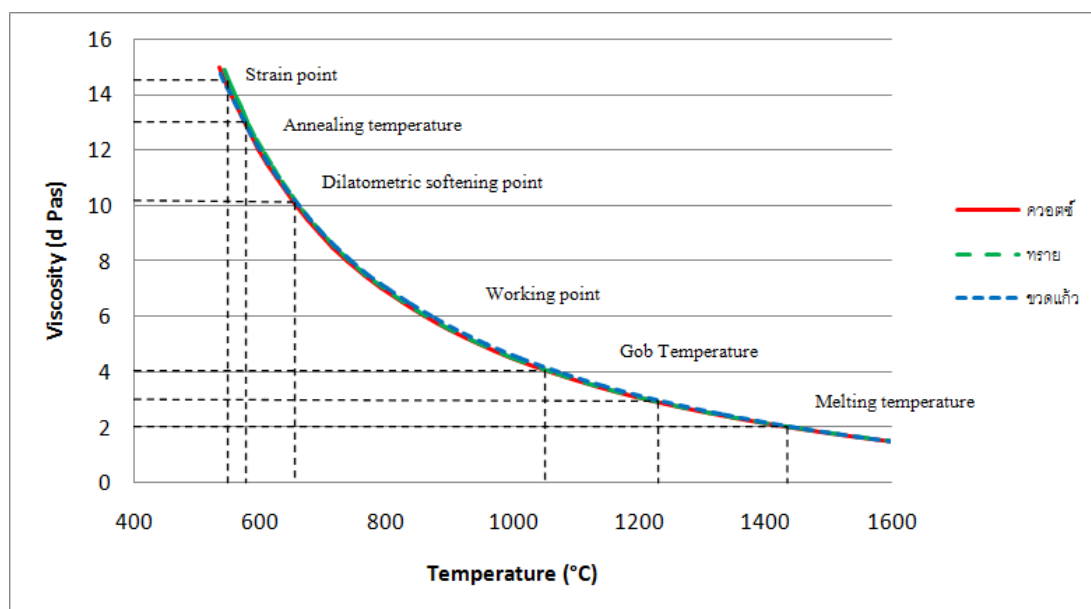


รูปที่ 4.12 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง Dilatometer แก้วขวดโซดาไลม์(สีน้ำเงิน) แก้วที่มาจากทราย(สีน้ำเขียว) แก้วที่มาจากควอตซ์(สีแดง)

4.3.4 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง Fiber elongation

รูปที่ 4.13 แสดงผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง Fiber elongation เพื่อทดสอบหาค่าอุณหภูมิจุดความเครียด (Strain point) อุณหภูมิอบอ่อน (Annealing temperature) อุณหภูมิจุดอ่อนตัว (Dilatometric softening point) อุณหภูมิสำหรับการขึ้นรูป (Working point) อุณหภูมิหยดน้ำแก้ว (Gob Temperature) และอุณหภูมิจุดหลอมเหลว (Melting temperature) ซึ่งแสดงในตารางที่ 4.6 พบว่าสมบัติทางความร้อนของแก้วทั้งสามมีค่าใกล้เคียง โดยค่าอุณหภูมิจุดความเครียดของขวดแก้วมีค่า 542.9 °C แก้วที่ได้จากทรายมีค่า 550.7 °C และแก้วที่ได้จากควอตซ์มีค่า 544.9 °C อุณหภูมิอบอ่อนของขวดแก้วมีค่า 574.7 °C แก้วที่ได้จากทรายมีค่า 580.5 °C และแก้วที่ได้จากควอตซ์มีค่า 575 °C อุณหภูมิจุดอ่อนตัวของขวดแก้วมีค่า 650.7 °C แก้วที่ได้จากทรายมีค่า 652.2 °C และแก้วที่ได้จากควอตซ์มีค่า 647.3 °C อุณหภูมิสำหรับการขึ้นรูปของขวดแก้วมีค่า 1072.6 °C แก้วที่ได้จากทรายมีค่า 1061.9 °C และแก้วที่ได้จากควอตซ์มีค่า 1059.3 °C อุณหภูมิหยดน้ำแก้วของขวดแก้วมีค่า 1228 °C แก้วที่ได้จากทรายมีค่า 1218.1 °C และแก้วที่ได้จากควอตซ์มีค่า 1215.7 °C อุณหภูมิจุดหลอมเหลวของขวดแก้วมีค่า 1452.1 °C แก้วที่ได้จากทรายมีค่า 1448.6 °C และแก้วที่ได้จากควอตซ์มีค่า 1445.8 °C นอกจากนี้ค่า working range

(อุณหภูมิระหว่าง Working point และ softening point) พบว่าแก้วที่ได้จากทรายและควอตซ์มีค่า working range ที่ใกล้เคียงกับของขวดแก้ว



รูปที่ 4.13 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง Fiber elongation แก้วขวดโซดาไลม์(สีน้ำเงิน) แก้วที่มาจากทราย(สีน้ำเขียว) แก้วที่มาจากควอตซ์(สีแดง)

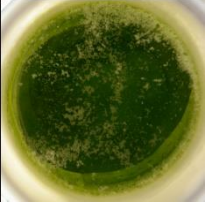



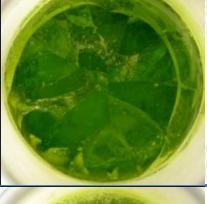
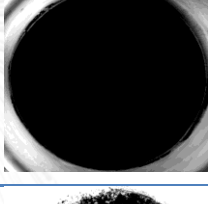
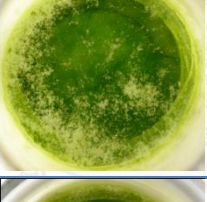
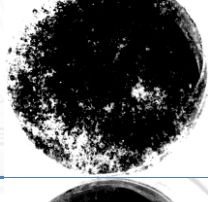
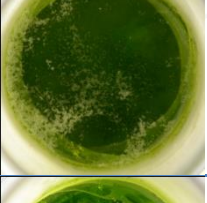
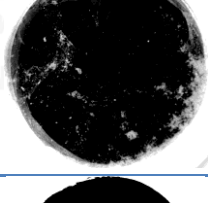

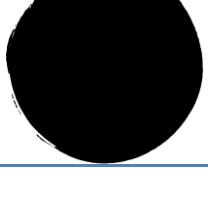
ตารางที่ 4.6 ผลจากการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง Fiber elongation

สมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง Fiber elongation	ขวดแก้ว	ทราย	ควอตซ์
Strain point (°C)	542.9	550.7	544.9
Annealing temperature (°C)	574.7	580.5	575
Dilatometric softening point (°C)	650.7	652.2	647.3
Working point (°C)	1072.6	1061.9	1059.3
Gob temperature (°C)	1228	1218.1	1215.7
Melting temperature (°C)	1452.1	1448.6	1445.8

4.4 ผลการวิเคราะห์ Batch-Free-Time

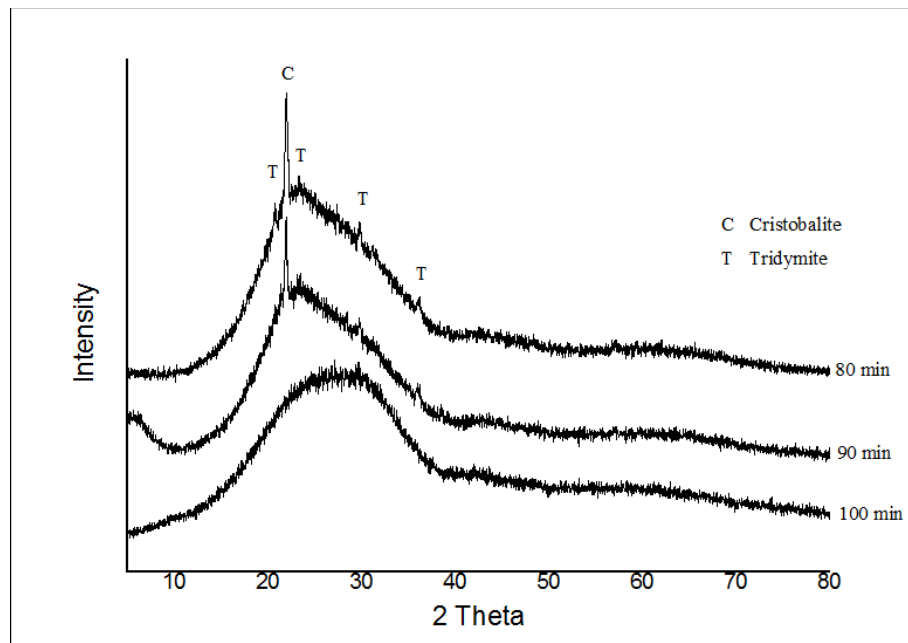
ตารางที่ 4.7 แสดงผลจากการทดสอบ Batch-Free-Time จากการทดลองหลอมวัสดุที่อุณหภูมิ 1400 °C ในช่วงเวลา 80-100 นาทีเพื่อหาช่วงระยะเวลาที่วัสดุหลอมตัวหมดและหาปริมาณที่เหลือบนผิวหน้าแก้วด้วยโปรแกรม photoshop โดยทำการปรับภาพแก้วสีเขียวให้เป็นภาพขาวดำ หลังจากการปรับภาพจะได้ภาพสีขาวของวัสดุที่ไม่หลอมและภาพสีดำของแก้วที่หลอมตัวหมด จากนั้นใช้โปรแกรม photoshop คำนวณพื้นที่ของวัสดุที่ไม่หลอม (สีขาว) เทียบกับแก้วที่หลอมตัวหมด (สีดำ) จากนั้นจึงนำค่าที่ได้จากโปรแกรม photoshop มาเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์ จากการทดลองพบว่าแก้วที่ได้จากทรายที่ระยะเวลา 80 นาทียังพบปริมาณของวัสดุบนผิวหน้าปริมาณ 20.88% ที่ระยะเวลา 90 นาทียังพบปริมาณของวัสดุบนผิวหน้าแต่ลดลงเมื่อเทียบกับเวลาที่ 80 นาทีโดยมีปริมาณ 15.52% และที่อุณหภูมิ 100 นาทีพบว่าปริมาณของวัสดุบนผิวหน้าหลอมตัวหมด แก้วที่ได้จากควอตซ์ที่ระยะเวลา 80 นาทียังพบปริมาณของวัสดุบนผิวหน้าปริมาณ 29.68% ที่ระยะเวลา 90 นาทียังพบปริมาณของวัสดุบนผิวหน้าแต่ลดลงเมื่อเทียบกับเวลาที่ 80 นาทีโดยมีปริมาณ 16.89% และที่อุณหภูมิ 100 นาทีพบว่าปริมาณของวัสดุบนผิวหน้าหลอมตัวหมด เมื่อเทียบผลการทดลองของแก้วที่ได้จากทั้งทรายและควอตซ์พบว่าที่ระยะเวลา 80 และ 90 นาทียังคงมีวัสดุที่ไม่หลอมอยู่บนผิวหน้า ที่ระยะเวลา 100 นาทีแก้วที่ได้จากทั้งทรายและควอตซ์วัสดุจะหลอมตัวหมด

ตารางที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์ Batch-Free-Time

ชื่อชิ้นงาน	ระยะเวลา (นาที)	รูปจากการทดลอง	รูปขาวดำ	ปริมาณที่ไม่หลอมบน ผิวหน้า (%)
ทราย	80			20.88
	90			15.52
	100			0
ควอตซ์	80			29.68
	90			16.89
	100			0

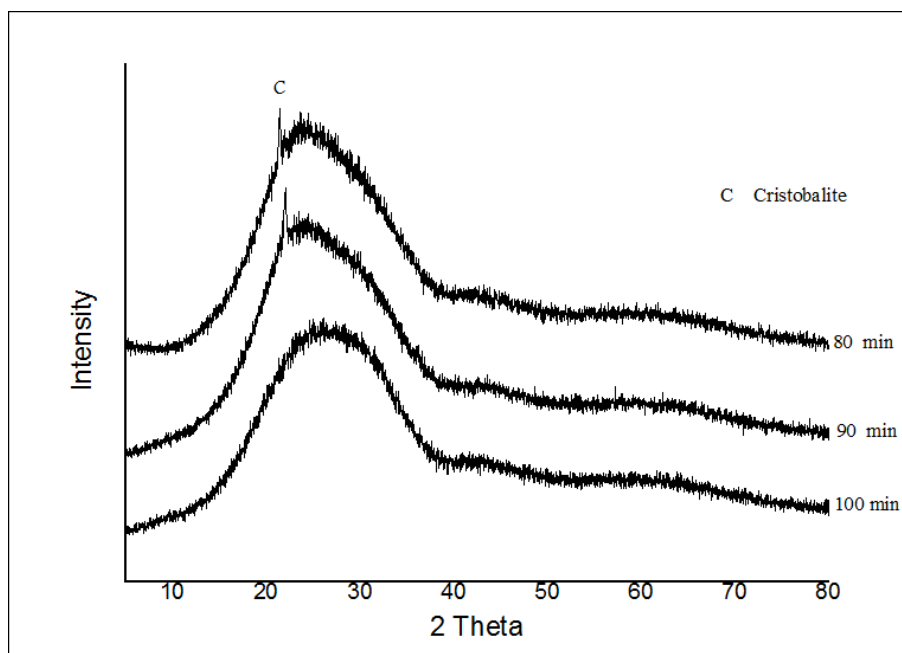
4.4.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของวัสดุบบนผิวหน้าด้วย X-ray Diffractometre

จากรูปที่ 4.14 แสดงผลวิเคราะห์องค์ประกอบของวัสดุบบนผิวหน้าของแก้วที่ใช้ทรายในการทดลอง เมื่อหลอมที่อุณหภูมิ 1400 °C ในช่วงระยะเวลา 80 90 และ 100 นาที พบว่าที่ระยะเวลา 80 และ 90 นาที พบเฟสของ SiO₂ รูปผลึก Cristobalite และ Tridymite เมื่อให้ระยะเวลาเพิ่มขึ้นเป็น 100 นาที SiO₂ ถูกหลอมจนหมดเหลือเพียงเฟสอสัณฐาน



รูปที่ 4.14 องค์ประกอบทางเฟสของแก้วที่ใช้ทรายที่หลอมที่เวลาต่างกัน

จากรูปที่ 4.15 แสดงผลวิเคราะห์องค์ประกอบของวัสดุบบนผิวหน้าของแก้วที่ใช้ควอตซ์ในการทดลอง เมื่อหลอมที่อุณหภูมิ 1400 °C ในช่วงระยะเวลา 80 90 และ 100 นาทีพบว่าที่ระยะเวลา 80 และ 90 นาทีพบเฟสของ SiO₂ รูปผลึก Cristobalite เมื่อให้ระยะเวลาเพิ่มขึ้นเป็น 100 นาที SiO₂ ถูกหลอมจนหมดเหลือเพียงเฟสอสัณฐาน



รูปที่ 4.15 องค์ประกอบทางเฟสของแก้วที่ใช้ควอตซ์ที่หลอมที่เวลาต่างกัน

4.5 การทดลองคำนวณพลังงานทางเทอร์โมไดนามิกส์

การคำนวณพลังงานทางเทอร์โมไดนามิกส์ใช้อุณหภูมิการทดลองที่ 1400 °C และไม่ใช่เศษแก้วในการทดลอง จากผลการคำนวณพลังงานทางเทอร์โมไดนามิกส์พบว่าแก้วที่ใช้ทรายในการทดสอบมีค่า H°_{glass} 3902.35 kWh/t ค่า H°_{gas} 379.03 kWh/t ค่า H°_{batch} 4427.47 kWh/t ค่า H°_{chem} 146.08 kWh/t และค่า H_{ex} 600.96 kWh/t แก้วที่ใช้ควอตซ์ในการทดสอบมีค่า H°_{glass} 3903.61 kWh/t ค่า H°_{gas} 377.53 kWh/t ค่า H°_{batch} 4427.26 kWh/t ค่า H°_{chem} 146.11 kWh/t และค่า H_{ex} 601.03 kWh/t ซึ่งจะแสดงในตารางที่ 4.8 ผลของค่าพลังงานความร้อนที่ใช้ในกระบวนการหลอมวัตถุดิบ (H_{ex}) ของแก้วที่ได้จากทรายและควอตซ์มีค่าใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 4.8 ค่าพลังงานด้วยเทอร์โมไดนามิกส์

พลังงาน	ทราย	ควอตซ์
H°_{glass} (kWh/t)	3902.35	3903.61
H°_{gas} (kWh/t)	379.03	377.53
H°_{batch} (kWh/t)	4427.47	4427.26
H°_{chem} (kWh/t)	146.08	146.11
H_{ex} (kWh/t)	600.96	601.03

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากผลการทดลองการหลอมด้วยขนาดอนุภาคที่แตกต่างกันของทรายและควอตซ์ การทดลองศึกษาสมบัติของแก้วโซดาไลม์สีเขียวที่ใช้แร่ควอตซ์เปรียบเทียบกับแก้วโซดาไลม์สีเขียวที่ใช้ทรายแก้ว การหาระยะเวลาการหลอมของวัตถุดิบด้วยวิธี Batch-Free-Time และการคำนวณพลังงานทางเทอร์โมไดนามิกส์ สรุปได้ดังนี้

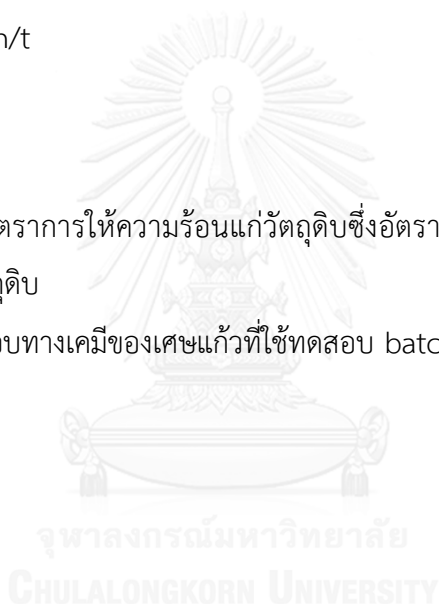
- 1) จากผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของทรายกับหินปูน ควอตซ์กับหินปูน ทรายกับโซดาแอช ควอตซ์กับโซดาแอช โดยวิเคราะห์ถึงที่อุณหภูมิ 850 °C พบว่าในช่วงอุณหภูมิ 571 °C เกิดการเปลี่ยนเฟส จาก α Quartz ไปเป็น β Quartz ช่วงอุณหภูมิ 748-760 °C เกิดการสลายตัวของหินปูนและช่วงอุณหภูมิ 748-760 °C เกิดการสลายตัวของโซดาแอช
- 2) จากการศึกษาขนาดอนุภาคของแร่ควอตซ์ที่ส่งผลต่อการหลอมแก้วที่ใช้ขนาดอนุภาคควอตซ์ขนาดเล็กจะหลอมได้ดีกว่าแก้วที่ใช้ขนาดอนุภาคควอตซ์ขนาดใหญ่ นอกจากนี้แก้วที่ใช้ช่วงอนุภาคขนาดเล็กของควอตซ์และทรายจะเกิดการหลอมตัวที่อุณหภูมิเดียวกัน
- 3) จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของขวดแก้วโซดาไลม์สีเขียวและแก้วที่ได้จากทรายและควอตซ์พบว่าปริมาณองค์ประกอบทางเคมีที่ใกล้เคียงกัน
- 4) จากผลการวิเคราะห์ค่าสีในระบบ CIE L^*a^*b ของแก้วที่ได้จากทรายและควอตซ์พบว่าแก้วที่ได้จากทรายและควอตซ์ มีค่าของสีที่ใกล้เคียงกันโดยที่แก้วที่มาจากควอตซ์มีสีเขียวอ่อนกว่าแก้วที่มาจากทรายเพียงเล็กน้อยโดยค่าสีในระบบ CIE L^*a^*b ของควอตซ์มีค่า $L^*= 61.04$ $a^*=-33.73$ $b^*= 78.93$
- 5) จากผลการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน อุณหภูมิการเปลี่ยนโครงสร้างของแก้วและอุณหภูมิจุดอ่อนตัว พบว่าแก้วที่ได้จากทรายและควอตซ์มีค่าใกล้เคียงกัน โดยค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนของแก้วที่ได้จากควอตซ์มีค่า $8.69 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ อุณหภูมิการเปลี่ยนโครงสร้างของแก้วมีค่า 566.49 °C อุณหภูมิจุดอ่อนตัวมีค่า 637.06 °C
- 6) จากผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง Fiber elongation เพื่อทดสอบหาค่าอุณหภูมิจุดความเครียด อุณหภูมิบ่ออ่อน อุณหภูมิจุดอ่อนตัว อุณหภูมิสำหรับการขึ้นรูป อุณหภูมิหยดน้ำแก้วและอุณหภูมิจุดหลอมเหลวพบว่าแก้วที่ได้จากทรายและควอตซ์มีค่าใกล้เคียงกัน โดยแก้วที่ได้จากควอตซ์มีค่าอุณหภูมิจุดความเครียดที่ 544.9 °C อุณหภูมิบ่อ

อ่อนของมีค่า 575 °C อุณหภูมิจุดอ่อนตัวมีค่า 647.3 °C อุณหภูมิสำหรับการขึ้นรูปมีค่า 1059.3 °C อุณหภูมิหยดน้ำแก้วมีค่า 1215.7 °C และอุณหภูมิจุดหลอมเหลวมีค่า 1445.8 °C

- 7) จากผลการวิเคราะห์หาระยะเวลาการหลอมด้วยวิธี Batch-Free-Time และองค์ประกอบของวัตถุดิบบนผิวหน้าพบว่าแก้วที่ได้จากทรายและควอตซ์ได้ผลการทดลองที่ใกล้เคียงกัน โดยที่ระยะเวลา 100 นาที พบว่าปริมาณของวัตถุดิบบนผิวหน้าหลอมตัวหมด
- 8) จากผลการวิเคราะห์การคำนวณพลังงานทางเทอร์โมไดนามิกส์พบว่าแก้วที่ใช้ทรายและควอตซ์มีค่าใกล้เคียงกันโดยแก้วที่ใช้ควอตซ์ในการทดสอบมีค่า H_{glass}° 3903.61 kWh/t ค่า H_{gas}° 377.53 kWh/t ค่า H_{batch}° 4427.26 kWh/t ค่า H_{chem}° 146.11 kWh/t และค่า H_{ex} 601.03 kWh/t

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) ศึกษาการปรับอัตราการให้ความร้อนแก่วัตถุดิบซึ่งอัตราความร้อนที่แตกต่างกันจะมีผลต่อการหลอมต่อวัตถุดิบ
- 2) ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของเศษแก้วที่ใช้ทดสอบ batch-free time ให้มีใส่ที่แตกต่างจากสีแก้วที่ใช้ทดลอง



รายการอ้างอิง

- [1] กระทรวงพลังงาน. ราคาปิโตรเลียม เดือน มกราคม ปี 2555 [ออนไลน์]. กรมเชื้อเพลิงธรรมชาติ, 2557. แหล่งที่มา: <http://www.dmf.go.th/service/monthlyPrice.php?m=1&y=2012&ln=th>. [5 กันยายน 2557]
- [2] กระทรวงพลังงาน. ราคาปิโตรเลียม เดือน มีนาคม ปี 2557 [ออนไลน์]. กรมเชื้อเพลิงธรรมชาติ, 2557. แหล่งที่มา: <http://www.dmf.go.th/service/monthlyPrice.php?m=3&y=2014&ln=th>. [5 กันยายน 2557]
- [3] กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. พ.ร.บ. กฎหมายและมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมมลพิษ [ออนไลน์]. กรมควบคุมมลพิษ, 2557. แหล่งที่มา: http://www.pcd.go.th/info_serv/reg_notification.html. [5 กันยายน 2557]
- [4] กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่. คู่มือการดำเนินธุรกิจแร่ทรายแก้วกับกัมพูชา [ออนไลน์]. กรมอุตสาหกรรม, 2557. แหล่งที่มา: <http://www.dpim.go.th/pr/article?catid=102&articleid=481>. [5 กันยายน 2557]
- [5] Macalik, B. and Morawska-Kowal, T. Coloration processes in soda-lime silicate glasses. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 191(2002): 379-381.
- [6] Sakaguchi, K. and Uchino, T. Compositional dependence of infrared absorption of iron-doped silicate glasses. Journal of Non-Crystalline Solids 353(2007): 4753-4761.
- [7] Yamashita, M., Akai, T., Sawa, R., Abe, J. and Matsumura, M. Effect of preparation procedure on redox states of iron in soda-lime silicate glass. Journal of Non-Crystalline Solids 354(2008): 4534-4538.
- [8] Donald, S. B., Swink, A. M. and Schreiber, H. D. High-iron ferric glass. Journal of Non-Crystalline Solids 352(2006): 539-543.
- [9] Mehdikhani, B. and Borhani, G. H. Optical spectroscopy of sodium silicate glasses prepared with nano- and micro-sized iron oxide particles. Processing and Application of Ceramics 7, 3(2013): 117-121.

- [10] Abbasi, M. and Hashemi, B. Fabrication and characterization of bioactive glass-ceramic using soda–lime–silica waste glass. Materials Science and Engineering C 37(2014): 399-404.
- [11] Axinte, E. Glasses as engineering materials: A review. Materials and Design 32(2011): 1717-1732.
- [12] Jiang, Z.-H. and Zhang, Q.-Y. The structure of glass: A phase equilibrium diagram approach. Progress in Materials Science 61(2014): 144-215.
- [13] Nascimento, M. L. F. Brief history of the flat glass patent e Sixty years of the float process. World Patent Information (2014): 1-7.
- [14] ผศ.ดร. ศิริธันว์ เจียมศิริเลิศ, วิชา 2311209 แก้วเบื้องต้น. เอกสารประกอบการสอน, 2555.
- [15] Bandyopadhyay, P., Dey, A., Roy, S. and Mukhopadhyay, A. K. Effect of load in scratch experiments on soda lime silica glass. Journal of Non-Crystalline Solids 358(2012): 1091-1103.
- [16] Deubener, J., Behrens, H., Müller, R., Zietka, S. and Reinsch, S. Kinetic fragility of hydrous soda-lime-silica glasses. Non-Crystalline Solids 354(2008): 4713-4718.
- [17] Suszynska, M., Szmida, M. and Grau, P. Mechanical characteristics of mixed soda-lime silicate glasses. Materials Science and Engineering A319-321 (2001): 702-705.
- [18] Zhang, J. and Sheng, J. Metastable defects induced by X-ray irradiation in Fe-doped soda-lime silicate glass. Optical Materials 35(2013): 1138-1140.
- [19] Suzuki, T., Konishi, J., Yamamoto, K., Ogura, S. and Fukutani, K. Practical IR extinction coefficients of water in soda lime aluminosilicate glasses determined by nuclear reaction analysis. Journal of Non-Crystalline Solids 382(2013): 66-69.
- [20] Biochemistry. Physical Properties [Online]. 2014. Availble from: <http://www.udel.edu/chem/GlassShop/PhysicalProperties.htm>. [5 September 2014]
- [21] Azom. Glass Analysis Using X-Ray Fluorescence [Online]. 2014. Availble from: <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6005>. [5 September 2014]

- [22] Bouty, O., Delaye, J. M., Beuneub and Charpentier, T. Modelling borosilicate glasses of nuclear interest with the help of RMC,WAXS, neutron diffraction and ^{11}B NMR. Journal of Non-Crystalline Solids 401(2014): 27-31.
- [23] Mendoza, C., et al. Oxide glass structure evolution under swift heavy ion irradiation. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 325 (2014): 54-65.
- [24] Sipp, A., Neuville, D. R. and Richet, P. Viscosity, configurational entropy and relaxation kinetics of borosilicate melts. Journal of Non-Crystalline Solids 211(1997): 281-293.
- [25] Bourhis, E. L. Glass Mechanics and Technology. Germany: Darmstadt, 2008.
- [26] JIGCHEM. Borosilicate Glass [Online]. 2014. Available from: <http://www.jigchemuniversal.com/borosilicate-glass-969453.html>. [5 September 2014]
- [27] กระทรวงการคลัง. คลินิกภาษีเครื่องประดับแก้วคริสตัล [ออนไลน์]. กระทรวงการคลัง, 2557. แหล่งที่มา: <http://taxclinic.mof.go.th/products/detail.php?ID=30>. [5 กันยายน 2557]
- [28] Directory, C. P. Opal glass [Online]. 2014. Available from: <http://hzchhc.en.made-in-hina.com/productimage/YeHJDVFoLXcy-2f1j00dBsEvFAhKjc/China-Opal-Glass-Dinner-Set.html>. [5 September 2014]
- [29] F.AL-Hillin, M. and KalidT.AL-Rasoul. Characterization of alumino-silicate glass/kaolinite composite. Ceramics International 39(2013): 5855-5862.
- [30] HOYA. aluminosilicate [Online]. 2014. Available from: <http://www.directindustry.com/prod/hoya/glass-panels-aluminosilicate-22692-520533.html>. [5 September 2014]
- [31] วชิรี ประภาชี. วัตถุดิบเซรามิก [ออนไลน์] . วัตถุดิบ, 2557. แหล่งที่มา: <http://www2.mtec.or.th/th/special/cdm/articles3.html>. [5 กันยายน 2557]
- [32] Crystallmaker. Silica Polymorphs [Online]. 2014. Available from: <http://www.crystallmaker.com/library/silica.html>. [5 September 2014]
- [33] กรมทรัพยากรธรณี. ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับทราย [ออนไลน์] . ทราย, 2557. แหล่งที่มา: http://www.dmr.go.th/download/document/minerals/sand/b2_22.pdf. [5 กันยายน 2557]

- [34] กรมทรัพยากรธรณี. แหล่งทรายแก้วในประเทศไทย [ออนไลน์] . ทราย, 2557.
แหล่งที่มา:
http://www.dmr.go.th/download/document/minerals/sand/e28_35.pdf. [5
กันยายน 2557]
- [35] กรมทรัพยากรธรณี. Quartz [ออนไลน์] . ควอตซ์, 2557. แหล่งที่มา:
<http://www.dmr.go.th/main.php?filename=quartz>. [5 กันยายน 2557]
- [36] Jadeja, R. N. and Tewari, A. Effect of soda ash industry effluent on agarophytes, alginophytes and carrageenophyte of west coast of India. Journal of Hazardous Materials 162(2009): 498-502.
- [37] Cormos, A.-M., Cormos, C.-C. and Agachi, P. S. Making soda ash manufacture more sustainable. A modeling study using ASPEN Plus. 17th European Symposium on Computer Aided Process Engineering (2007): 551-556.
- [38] กรมทรัพยากรธรณี. โดโลไมต์ (Dolomite) [ออนไลน์] . โดโลไมต์, 2557. แหล่งที่มา:
<http://www.dmr.go.th/main.php?filename=dolomite>. [5 กันยายน 2557]
- [39] ดร. คชินท์ สายอินทวงศ์, เรื่องน่ารู้เกี่ยวกับหินปูน [ออนไลน์] . หินปูน, 2557.
แหล่งที่มา :http://www.thaiceramicsociety.com/rm_soil_limestone.php.
[5 กันยายน 2557]
- [40] ดร. คชินท์ สายอินทวงศ์, การลอยแร่เฟลด์สปาร์ (Feldspar Flotation) [ออนไลน์] .
เฟลด์สปาร์, 2557. แหล่งที่มา:
http://www.thaiceramicsociety.com/rm_paint_feld.php. [5 กันยายน 2557]
- [41] Cegliala, A., et al. Colour and Chemistry of the glass finds in the Roman villa of Treignes, Belgium. Procedia Chemistry 8(2013): 55 - 64.
- [42] Bamford, C. R. Colour generation and control in glass. New York: Ormskirk, 1984.
- [43] A.Weyl, W. Coloured Glasses. United Kingdom: The Society of Glass Technology, 1999.
- [44] Terczynska-Madej, A., Cholewa-Kowalska, K. and Laczka, M. The effect of silicate network modifiers on colour and electron spectra of transition metal ions. Optical Materials 32(2010): 1456-1462.

- [45] Jitwatcharakomola, T., Meechoowa, E., Jiarawattananon, M. and Jiemsirilers, S. Kinetic Investigation on the Color Striking of Gold Ruby Glass. Procedia Engineering 32(2012): 584 - 589.
- [46] Prochazka, R. Natural corrosion of the uranium-colored historical glasses. Journal of Non-Crystalline Solids 353(2007): 2052-2056.
- [47] Möncke, D., Papageorgiou, M., Winterstein-Beckmann, A. and Zacharias, N. Roman glasses coloured by dissolved transition metal ions: redox reactions, optical spectroscopy and ligand field theory. Journal of Archaeological Science 46(2014): 23-36.
- [48] Hubert, M., et al. Stabilization of divalent chromium Cr(II) in soda–lime–silicate glasses. Journal of Non-Crystalline Solids 403 (2014): 23-29.
- [49] Thai Glass Industries Public Company Limited. Glass technical training center [Online]. 2014. Available from http://www.thaiglass.co.th/th/technical_training_center.php. [5 September 2014]
- [50] ผศ. ปรีญา อนุพงษ์อองอาจ. แสง [ออนไลน์] . 2557. แหล่งที่มา: http://www.rmutphysics.com/physics/oldfront/62/light1/ligh_1.htm. [5 กันยายน 2014]
- [51] Das, P., Park, Y. and Kim, K.-D. Performance improvement of color space based VLC modulation schemes under color and intensity variation. Optics Communications 303(2013): 1-7.
- [52] Korifi, R., Dre´au, Y. L., Antinelli, J.-F., Valls, R. and Dupuy, N. CIEL*a*b* color space predictive models for colorimetry devices–Analysis of perfume quality Talanta 104(2013): 58-66.
- [53] Tapasa, K. and Jitwatcharakomol, T. Thermodynamic calculation of exploited heat used in glass melting furnace. Procedia Engineering 32(2012): 969 – 975.
- [54] Conradt, R. The industrial glass-melting process [Online]. 2014. Available from <http://www.ghi.rwth-aachen.de/www/pages/glas/Unterlagen/Chemie/The%20industrial%20glass%20melting%20process%202008.pdf>. [5 September 2014]

- [55] Sheckler, C. A. and Dinger, D. R. Effect of particle size distribution on the melting of soda-lime-silica glass. The American Ceramic Society 73(1990): 24-30.
- [56] Schweiger, M. J., et al. Cluster formation of silica particles in glass batches during melting. Non-Crystalline Solids 356((2010): 1359-1367.
- [57] Hрма, P., et al. Conversion of batch to molten glass, II: Dissolution of quartz particles. Non-Crystalline Solids 357(2011): 820-828.
- [58] Hрма, P. and Marcial, J. Dissolution retardation of solid silica during glass-batch melting. Non-Crystalline Solids 357 (2011): 2954-2959.
- [59] Pokorny, R., Rice, J. A., Crum, J. V., Schweiger, M. J. and Hрма, P. Kinetic model for quartz and spinel dissolution during melting of high-level-waste glass batch. Nuclear Materials 443(2013): 230-235.
- [60] Meechoowas, E., Ketboonruang, P., Tapasa, K. and Jitwatcharakomol, T. Improve melting glass efficiency by Batch-to melt conversion. Procedia Engineering 32(2012): 956 - 961.

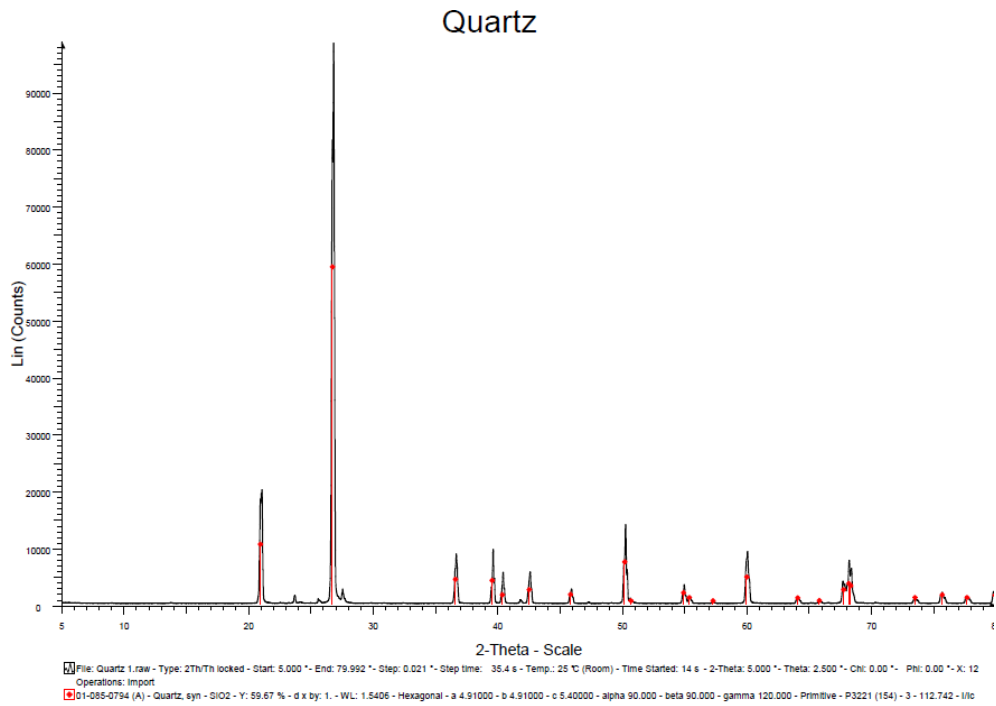


ภาคผนวก

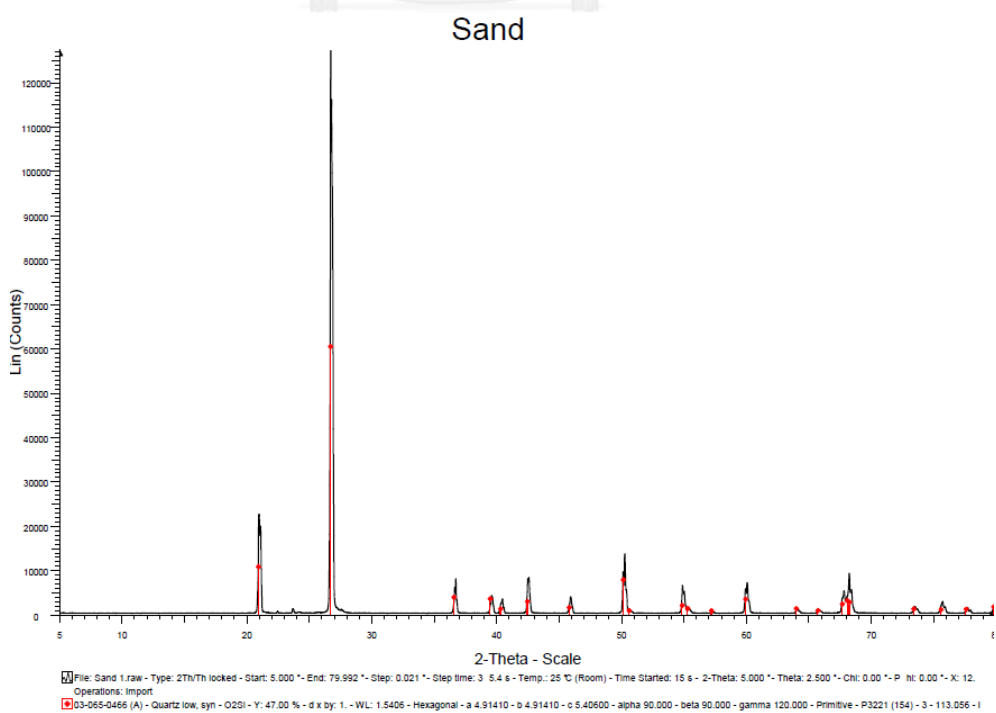
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

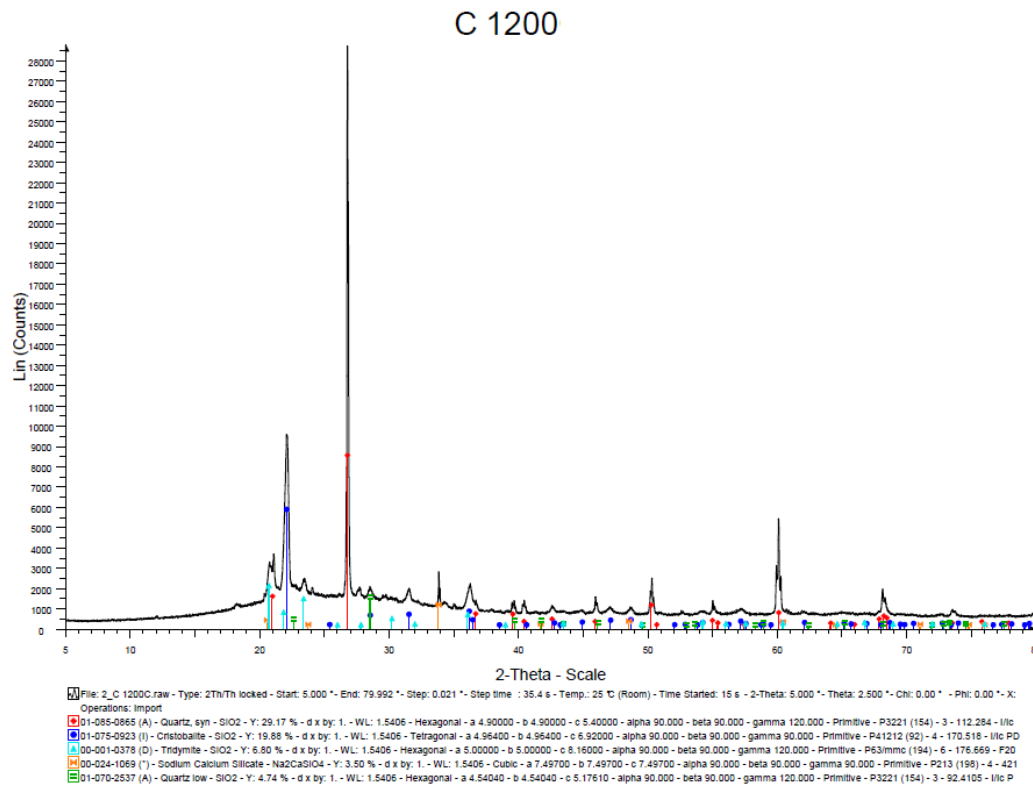
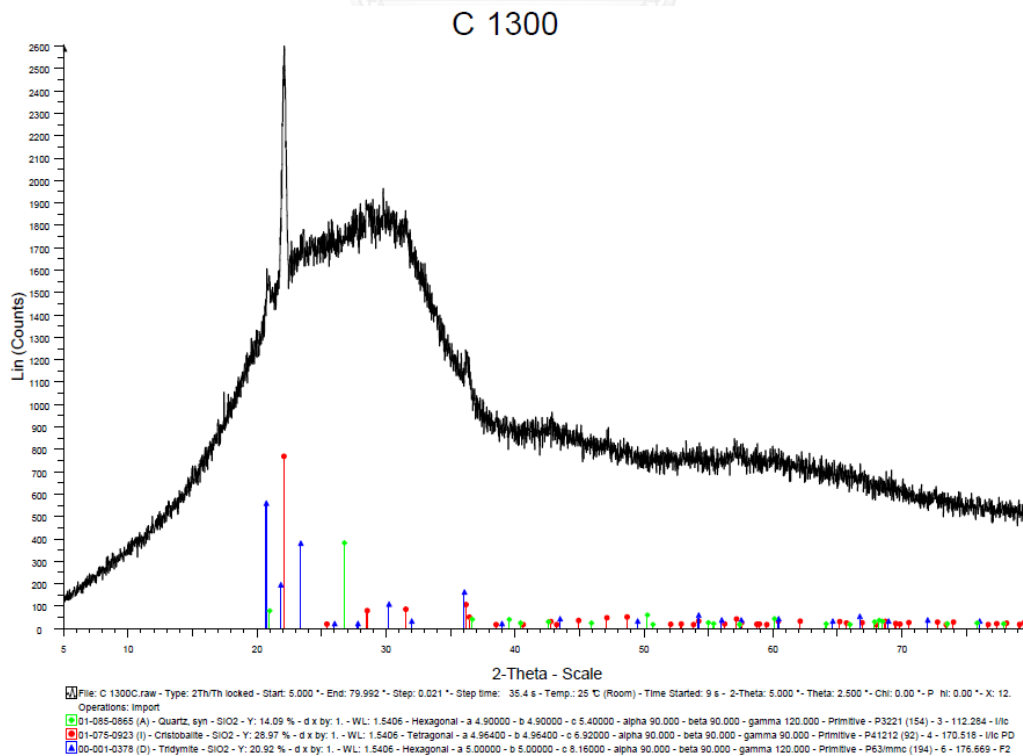
ภาคผนวก ก

รูปที่ ก-1 ค่า 2θ และ Intensity ของควอตซ์

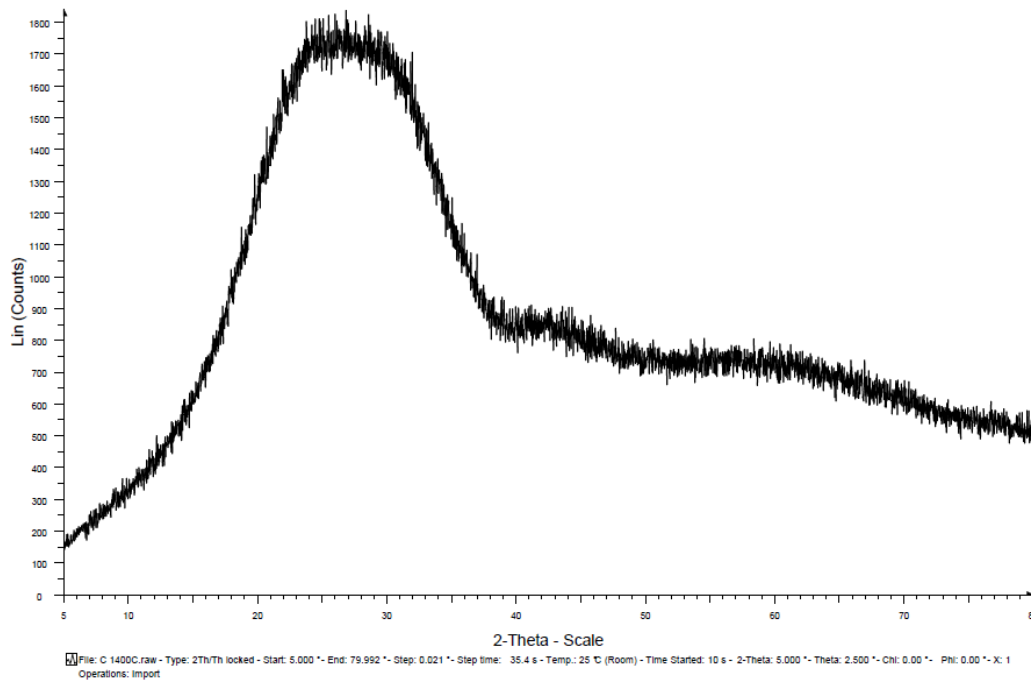


รูปที่ ก-2 ค่า 2θ และ Intensity ของทราย

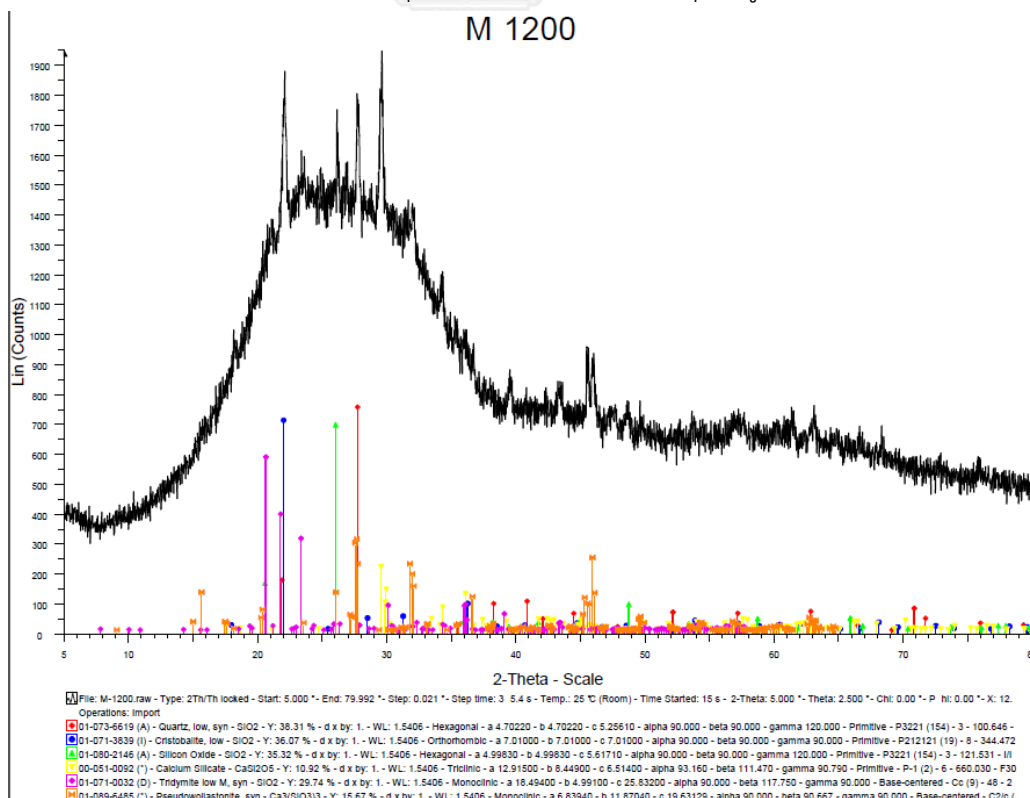


รูปที่ ก-3 ค่า 2 θ และ Intensity ของอนุภาคควอตซ์ขนาดใหญ่ที่อุณหภูมิ 1200 °Cรูปที่ ก-4 ค่า 2 θ และ Intensity ของอนุภาคควอตซ์ขนาดใหญ่ที่อุณหภูมิ 1300 °C

รูปที่ ก-5 ค่า 2 θ และ Intensity ของอนุภาคควอตซ์ขนาดใหญ่ที่อุณหภูมิ 1400 °C
C 1400

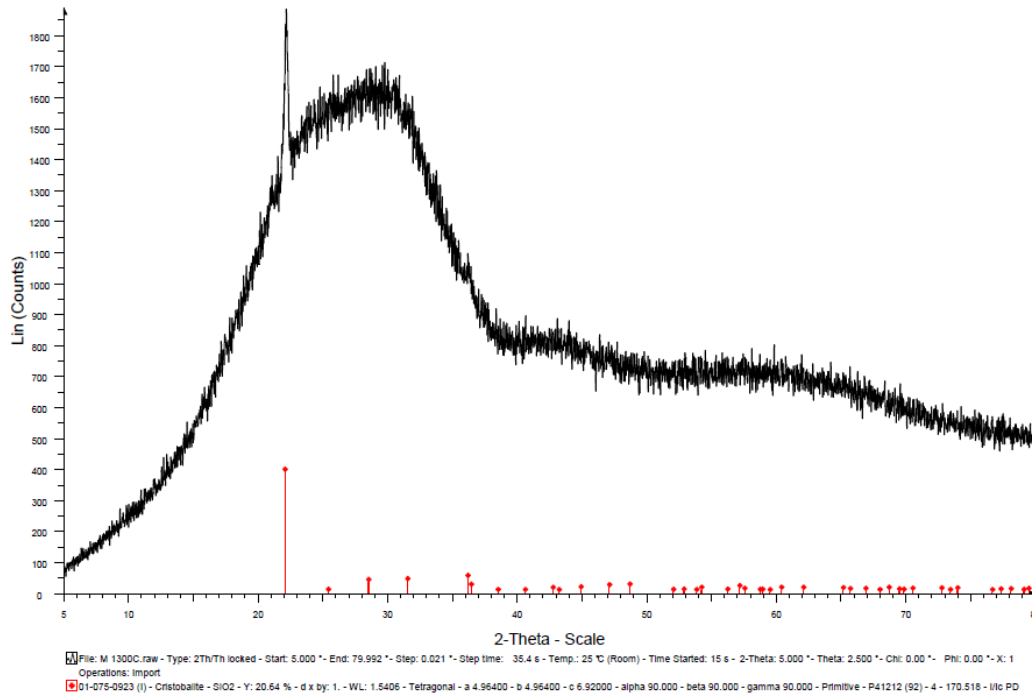


รูปที่ ก-6 ค่า 2 θ และ Intensity ของอนุภาคควอตซ์ขนาดกลางที่อุณหภูมิ 1200 °C
M 1200

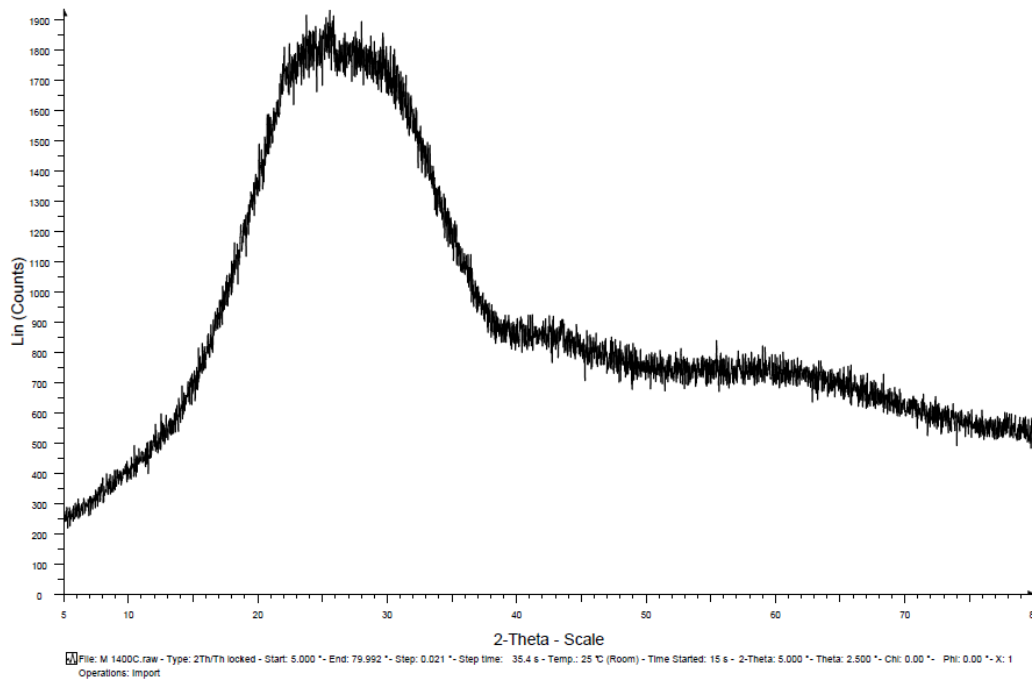


รูปที่ ก-7 ค่า 2 θ และ Intensity ของอนุภาคควอตซ์ขนาดกลางที่อุณหภูมิ 1300 °C

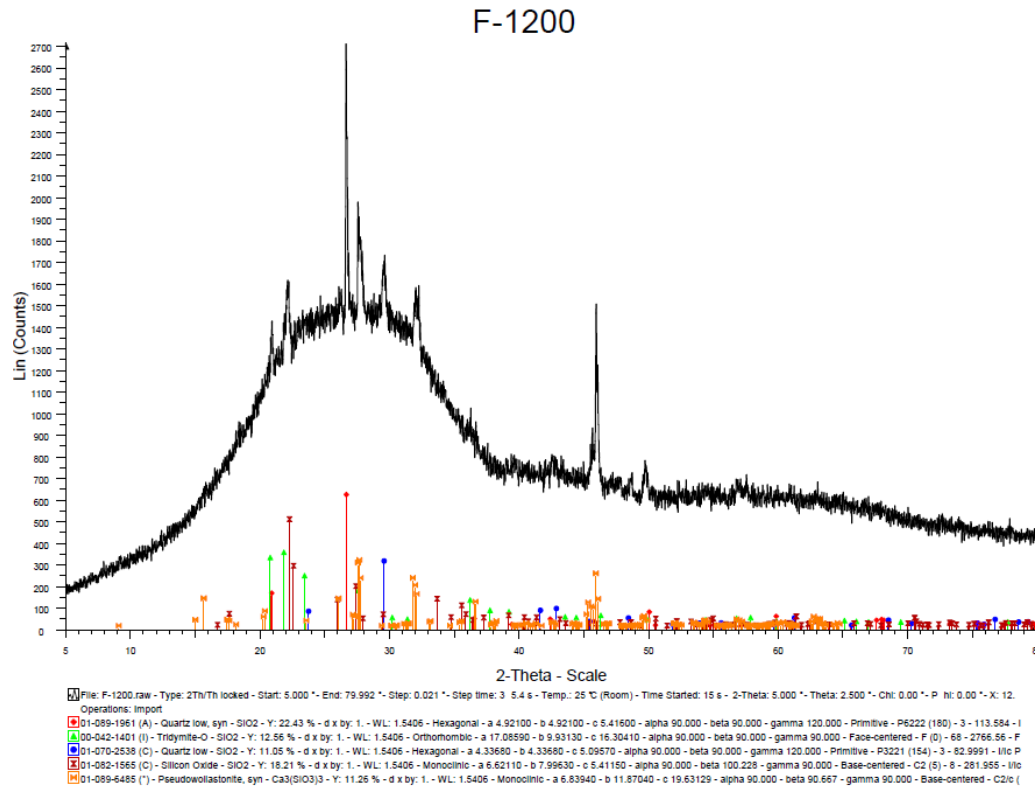
M 1300

รูปที่ ก-8 ค่า 2 θ และ Intensity ของอนุภาคควอตซ์ขนาดกลางที่อุณหภูมิ 1400 °C

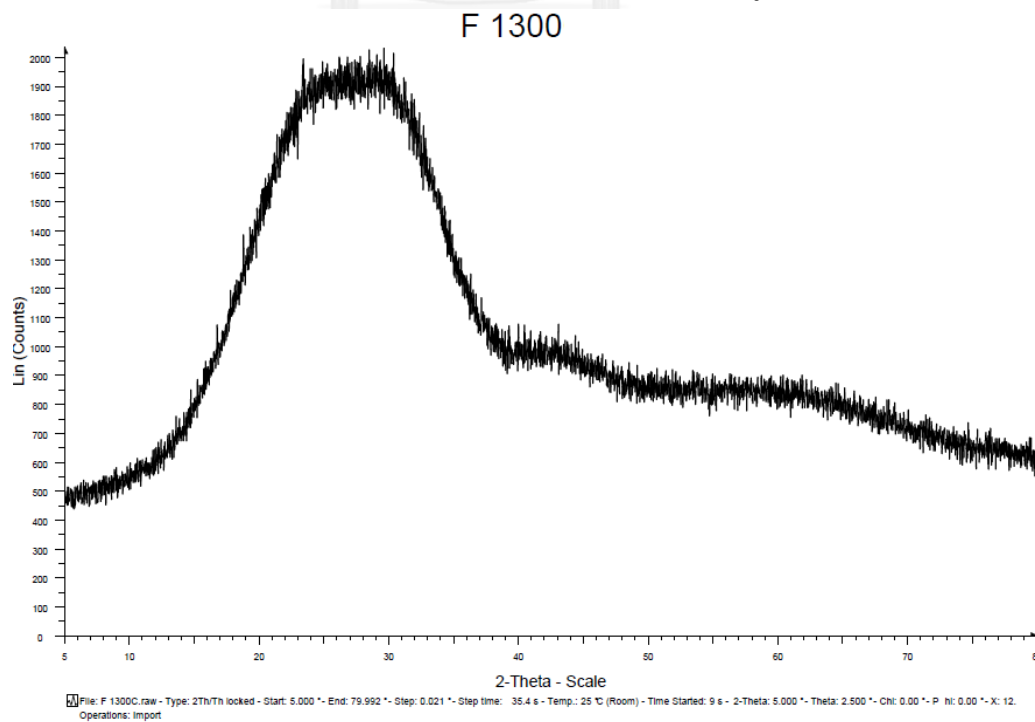
M 1400



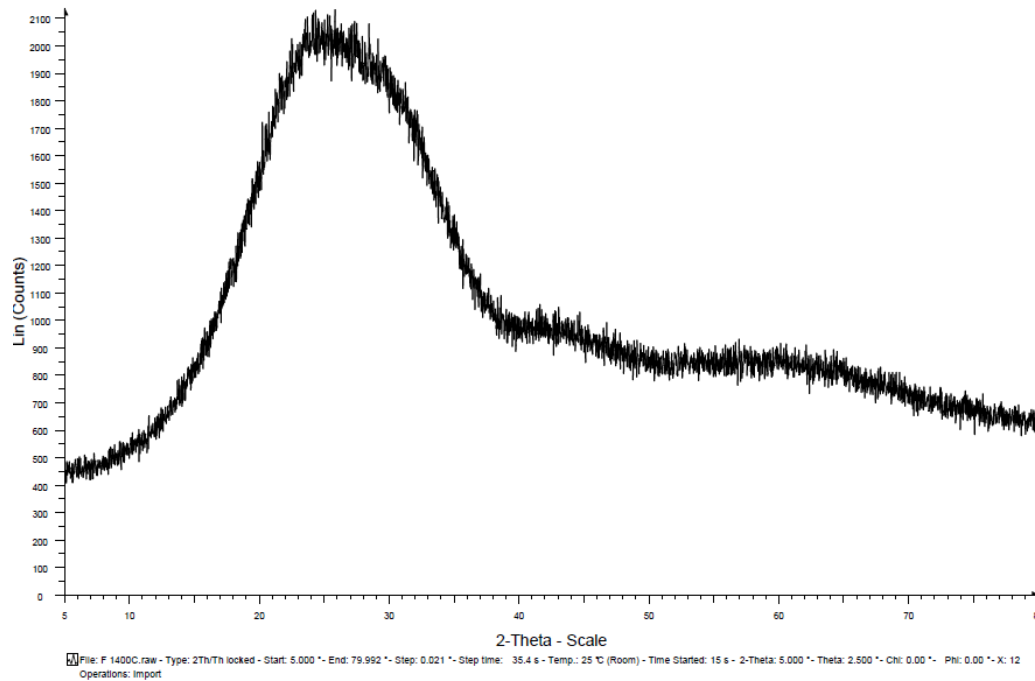
รูปที่ ก-9 ค่า 2θ และ Intensity ของอนุภาคควอตซ์ขนาดเล็กที่อุณหภูมิ 1200 °C



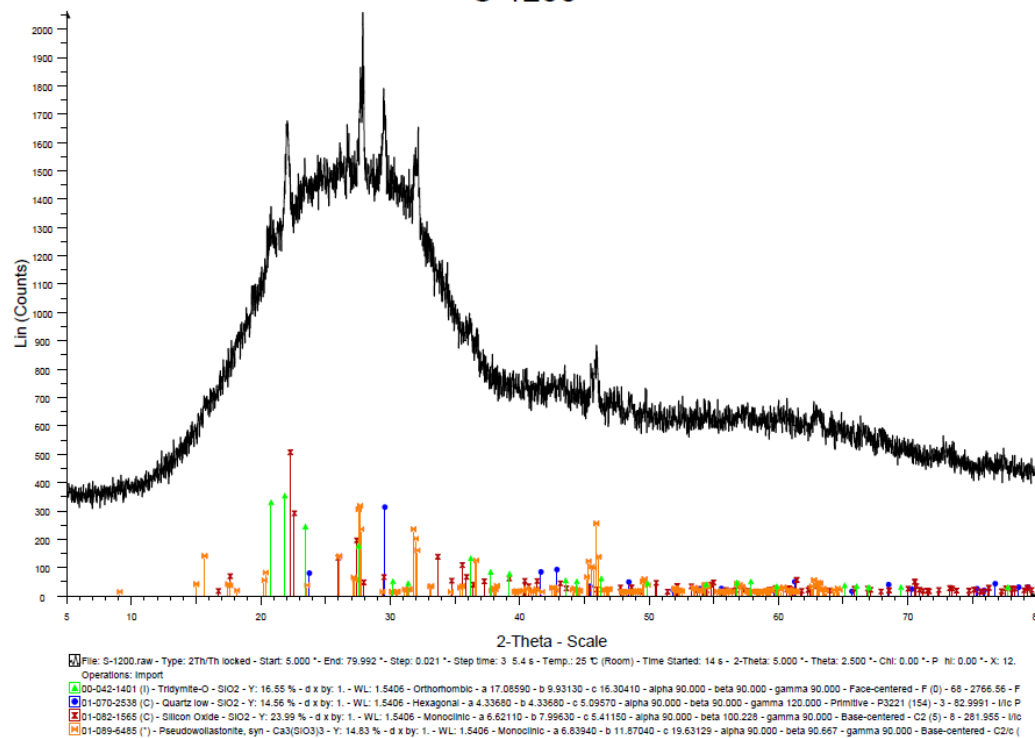
รูปที่ ก-10 ค่า 2θ และ Intensity ของอนุภาคควอตซ์ขนาดเล็กที่อุณหภูมิ 1300 °C



รูปที่ ก-11 ค่า 2θ และ Intensity ของอนุภาคควอตซ์ขนาดเล็กที่อุณหภูมิ 1400 °C
F 1400

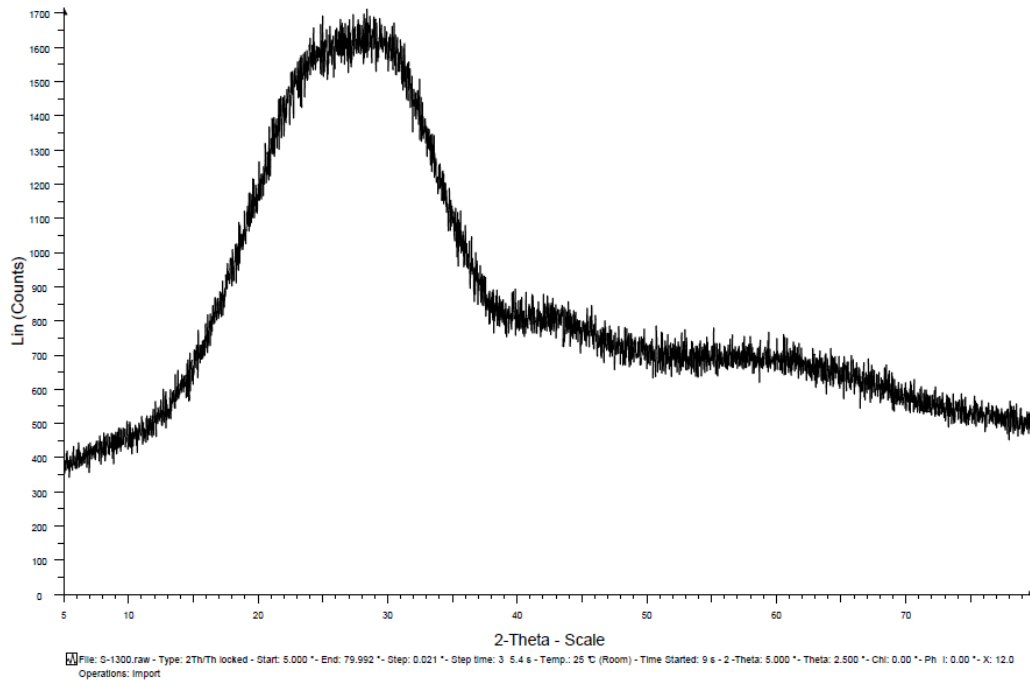


รูปที่ ก-12 ค่า 2θ และ Intensity ของอนุภาคทรายขนาดเล็กที่อุณหภูมิ 1200 °C
S 1200



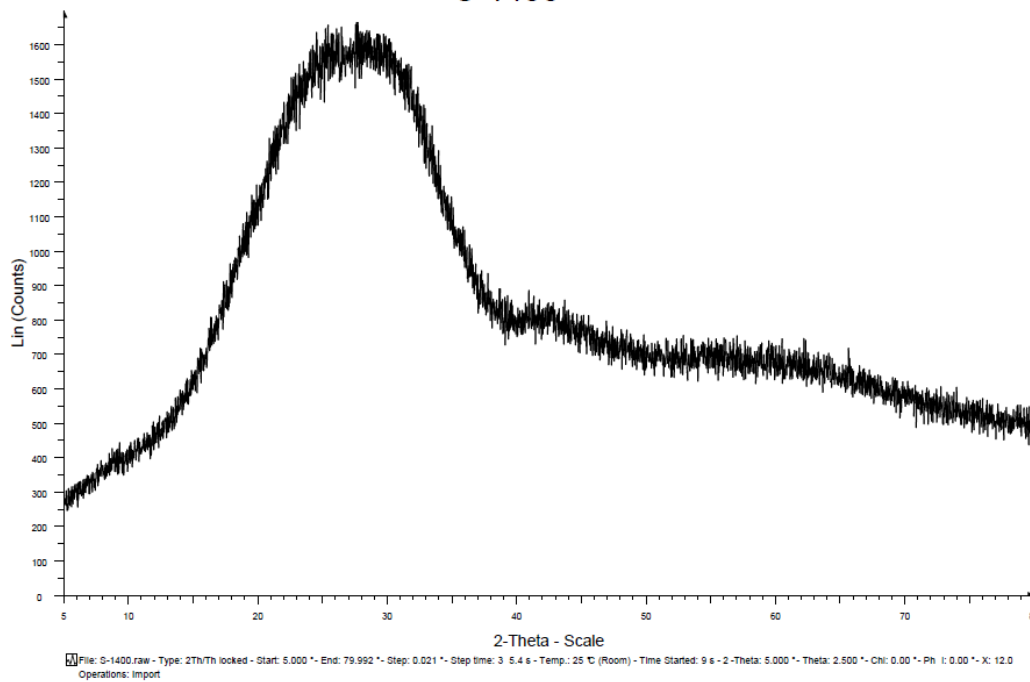
รูปที่ ก-13 ค่า 2θ และ Intensity ของอนุภาคทรายขนาดเล็กที่อุณหภูมิ 1300 °C

S 1300



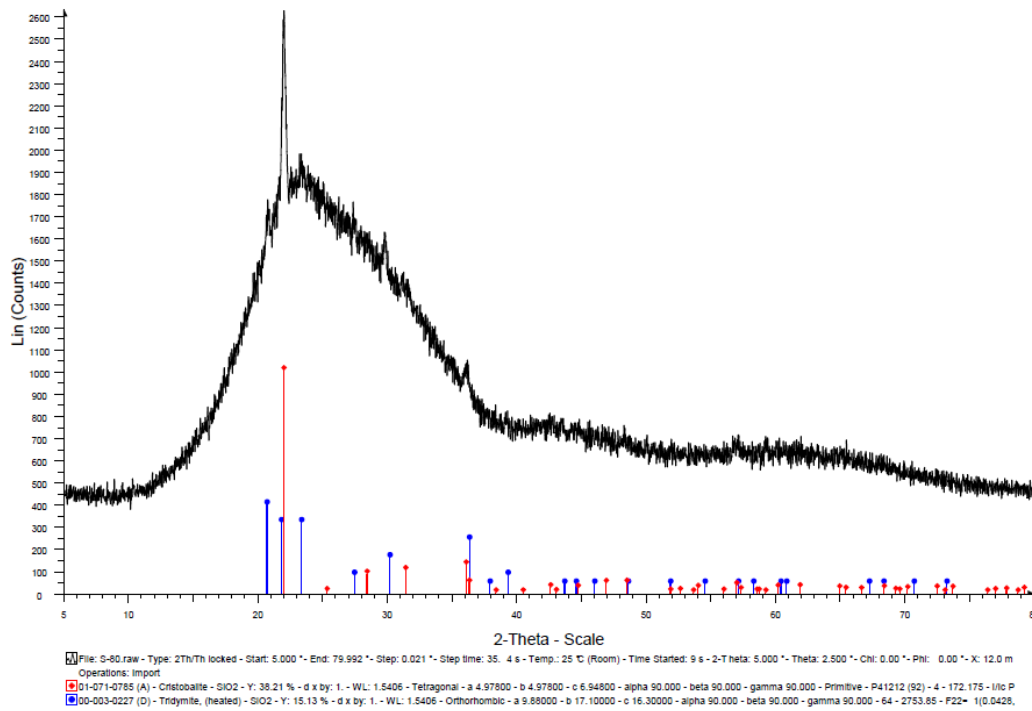
รูปที่ ก-14 ค่า 2θ และ Intensity ของอนุภาคทรายขนาดเล็กที่อุณหภูมิ 1400 °C

S 1400



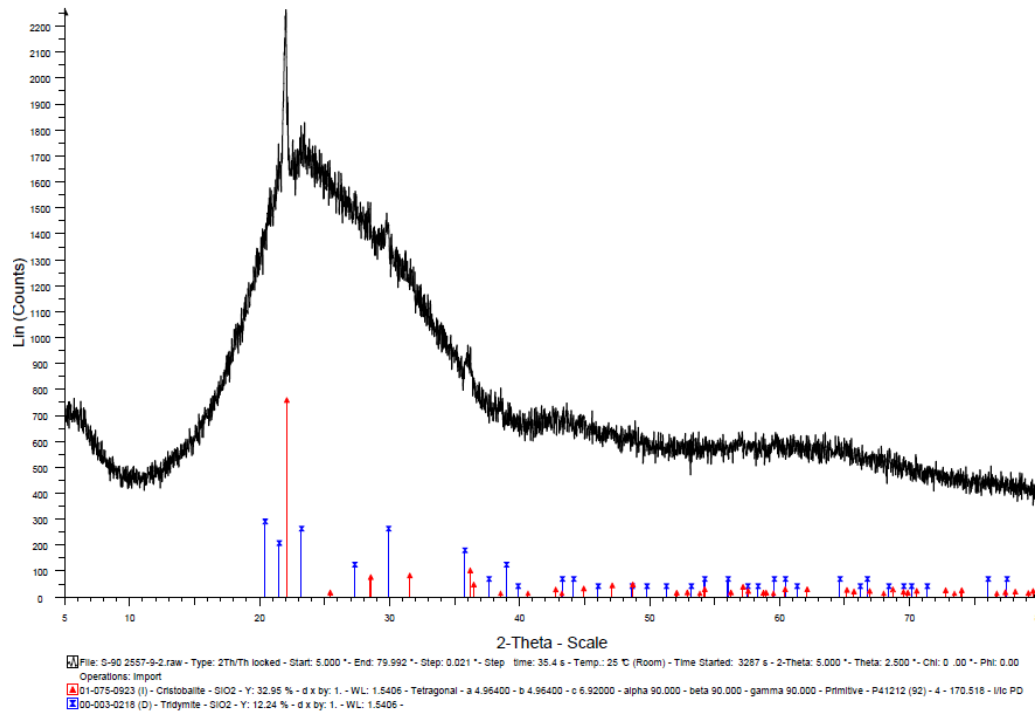
รูปที่ ก-15 ค่า 2 θ และ Intensity ของแก้วที่ใช้ทรายที่ระยะเวลา 80 นาที

S-80

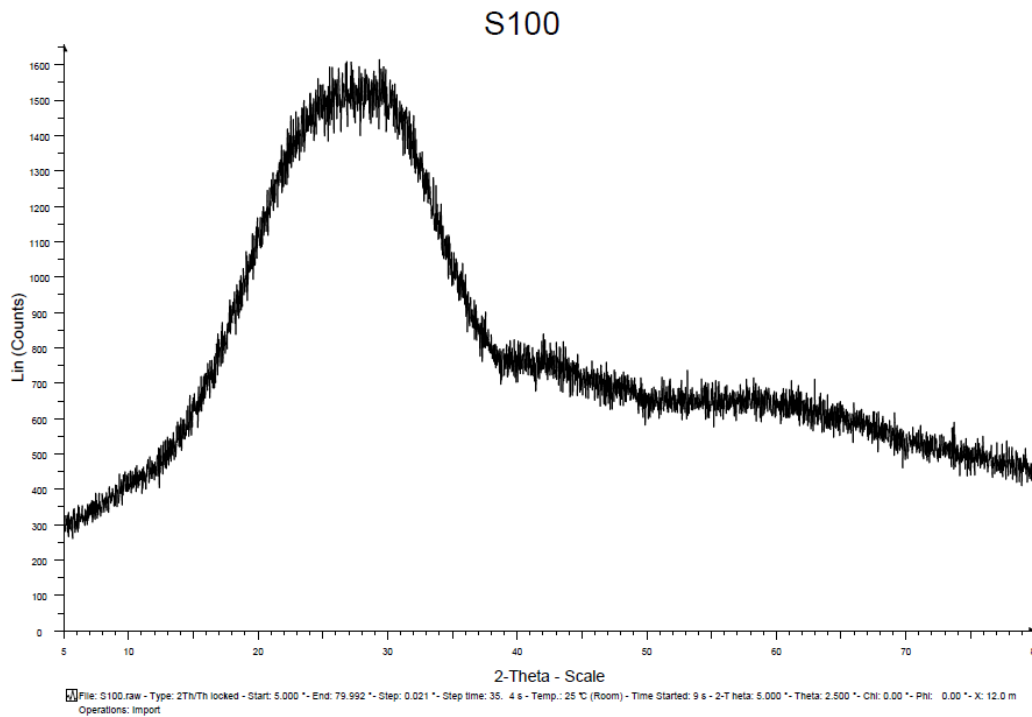


รูปที่ ก-16 ค่า 2 θ และ Intensity ของแก้วที่ใช้ทรายที่ระยะเวลา 90 นาที

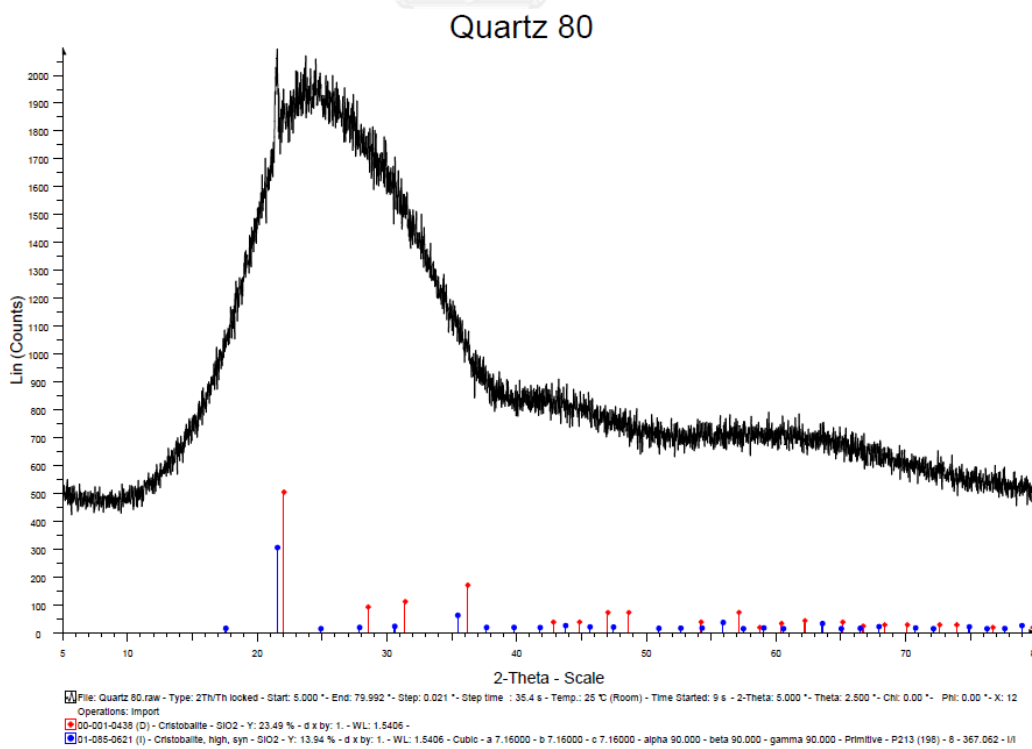
S 90



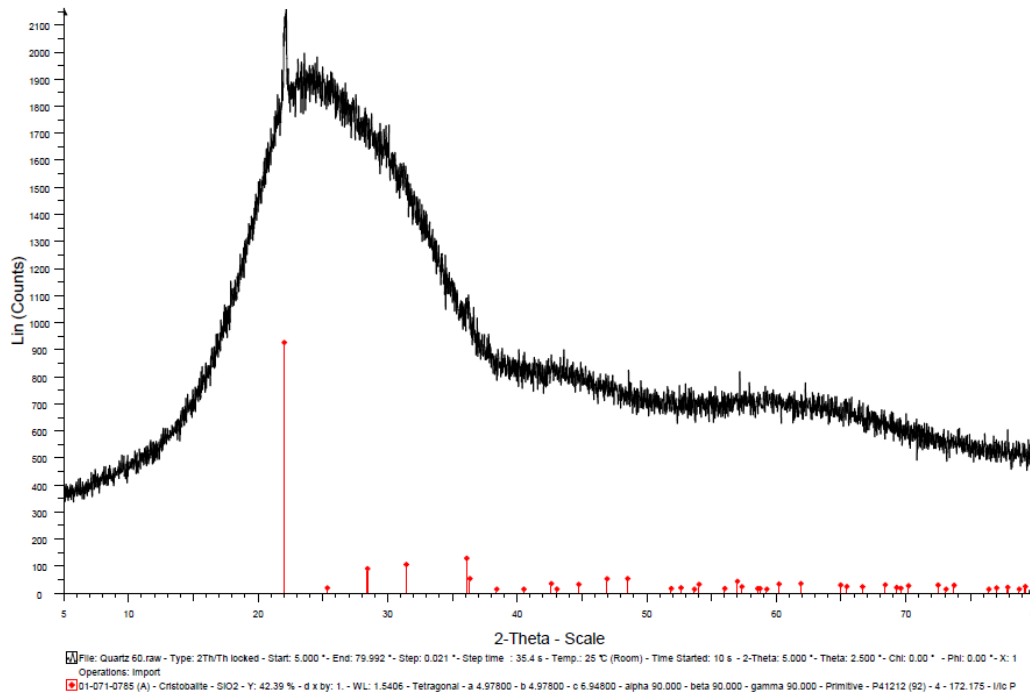
รูปที่ ก-17 ค่า 2θ และ Intensity ของแก้วที่ใช้ทรายที่ระยะเวลา 100 นาที



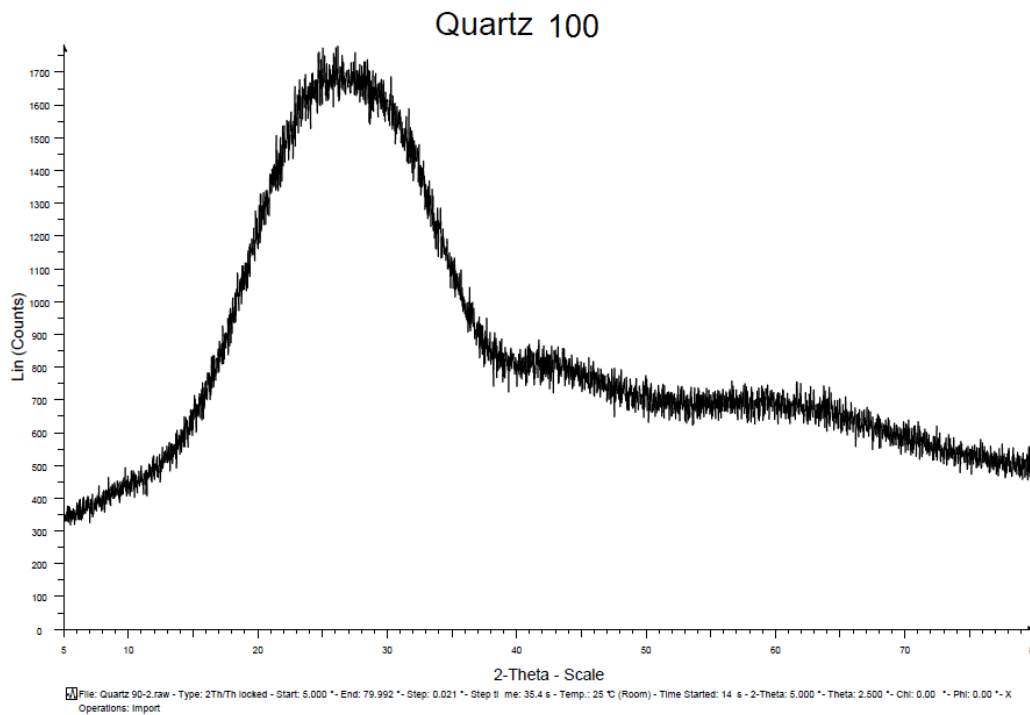
รูปที่ ก-18 2θ และ Intensity ของแก้วที่ใช้ควอตซ์ที่ระยะเวลา 80 นาที



รูปที่ ก-19 ค่า 2θ และ Intensity ของแก้วที่ใช้ควอตซ์ที่ระยะเวลา 90 นาที
Quartz 90

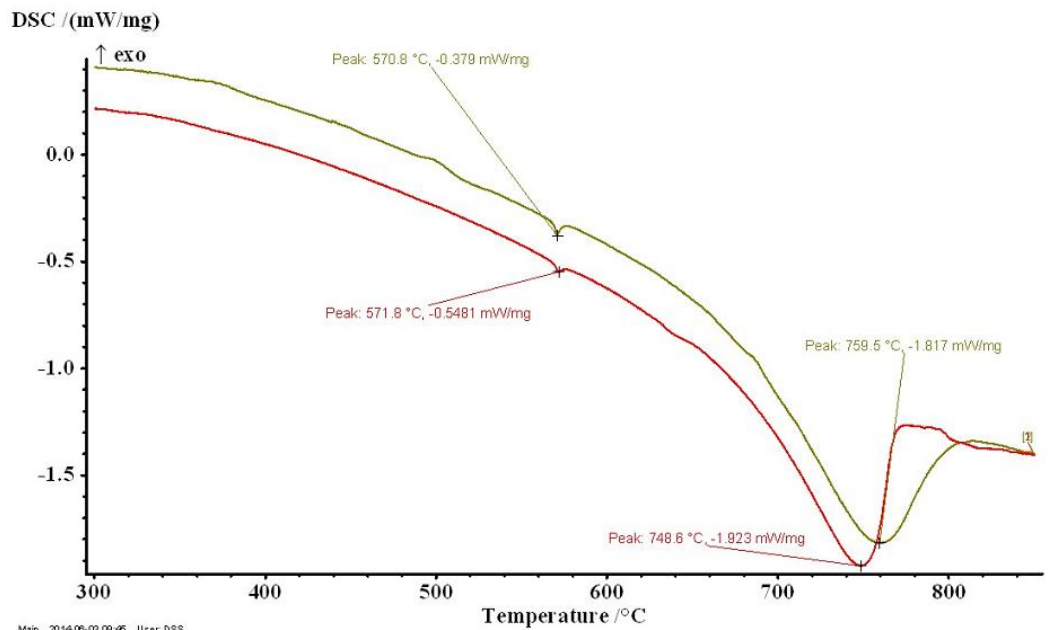


รูปที่ ก-20 ค่า 2θ และ Intensity ของแก้วที่ใช้ควอตซ์ที่ระยะเวลา 100 นาที

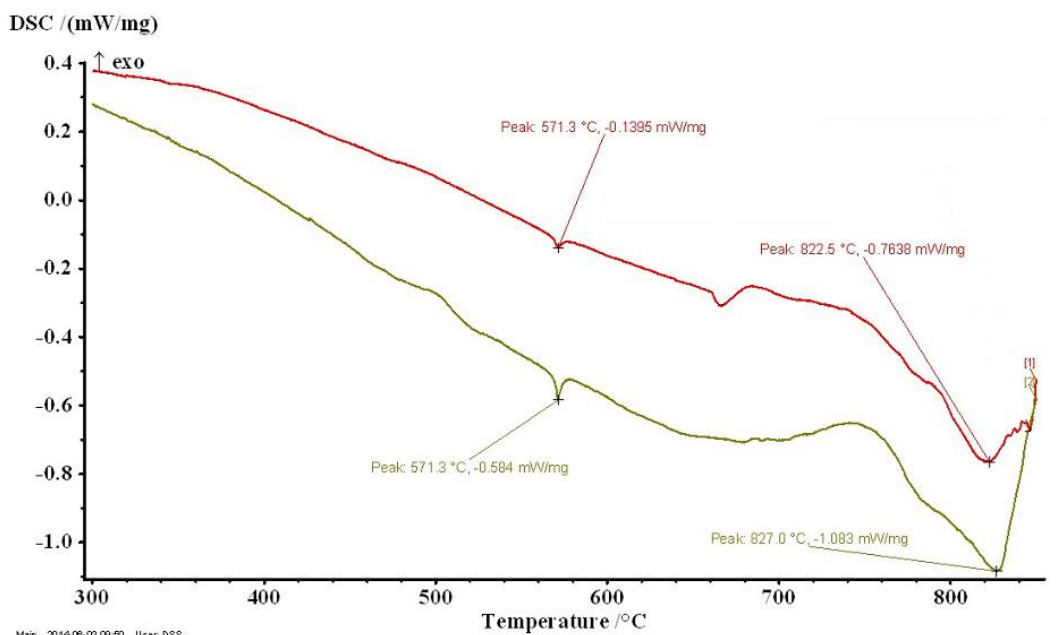


ภาคผนวก ข

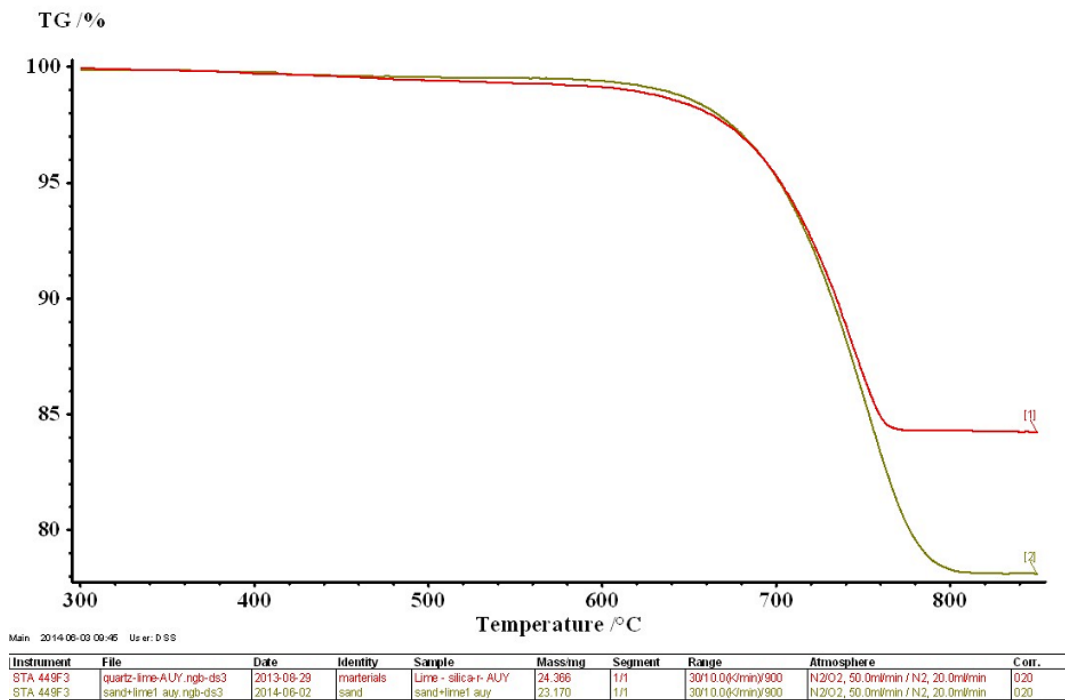
รูปที่ ข-1 ค่า DSC ของทรายกับหินปูนและควอตซ์กับหินปูน



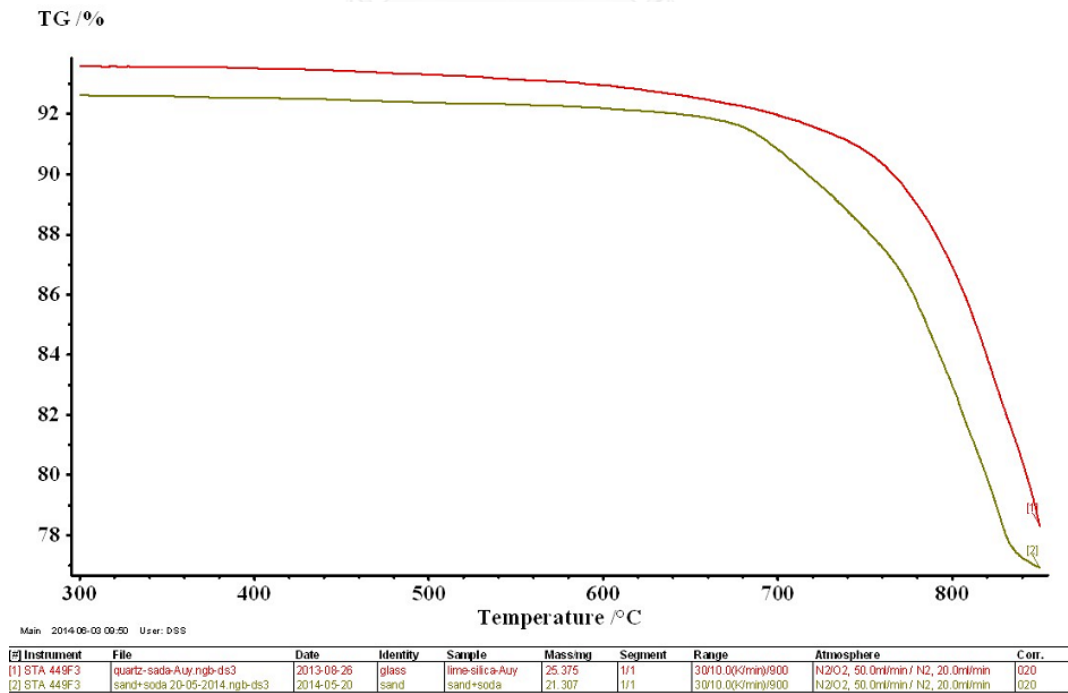
รูปที่ ข-2 ค่า DSC ของทรายกับโซดาแอชและควอตซ์กับกับโซดาแอช



รูปที่ ข-3 ค่า TGA ของทรายกับหินปูนและควอตซ์กับหินปูน

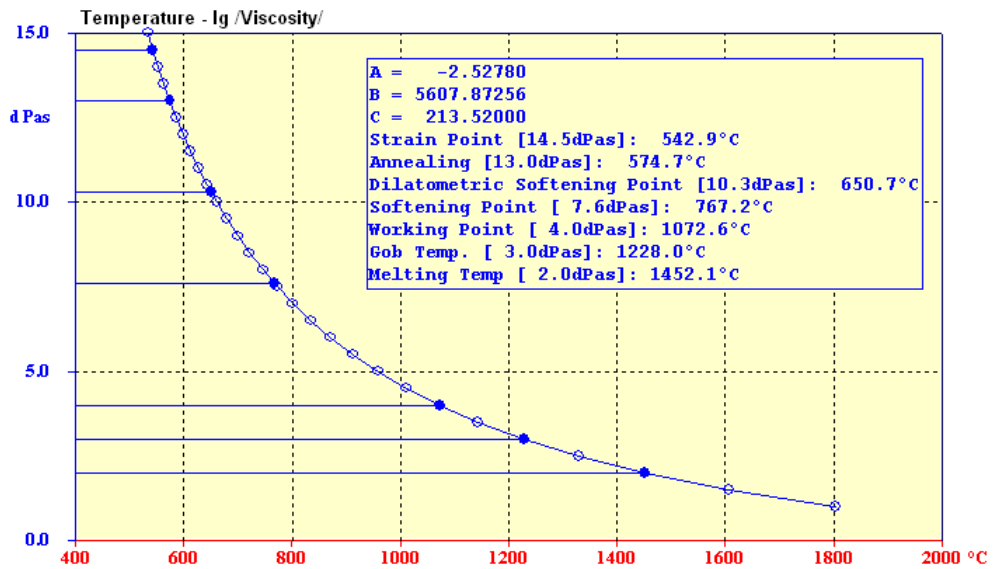


รูปที่ ข-4 ค่า TGA ของทรายกับโซดาแอชและควอตซ์กับโซดาแอช

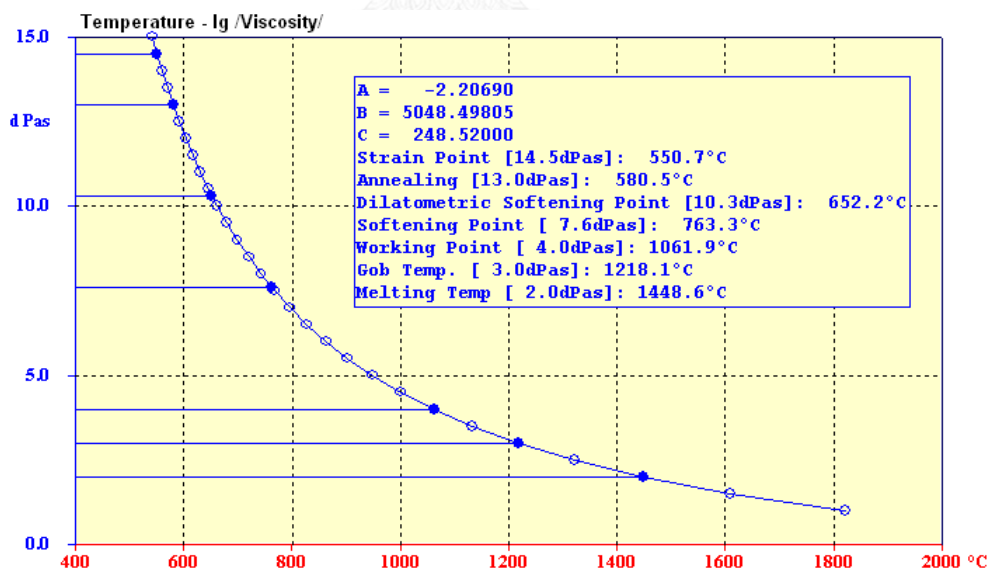


ภาคผนวก ค

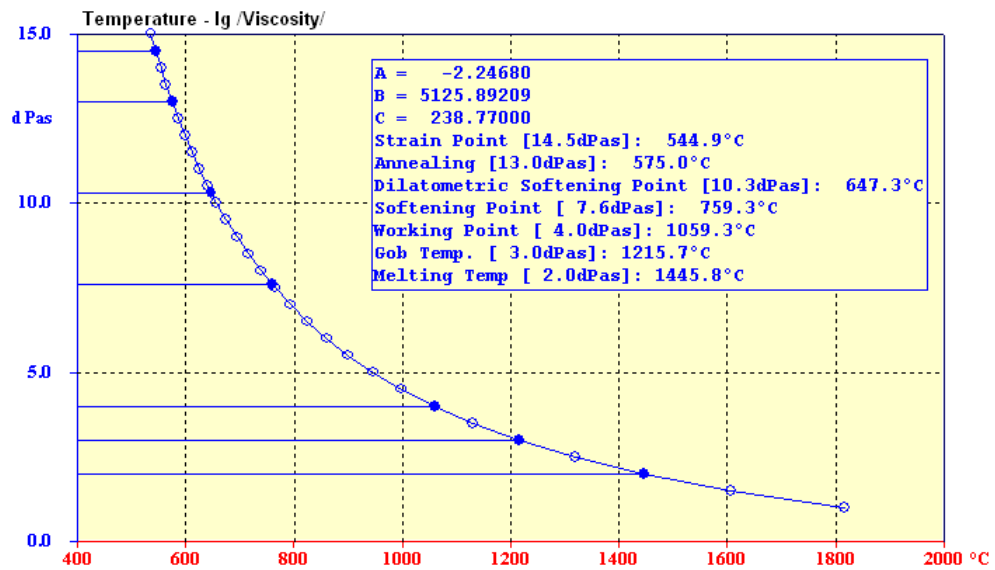
รูปที่ ค-1 ค่าความหนืดของแก้วขวดโซดาไลม์



รูปที่ ค-2 ค่าความหนืดของแก้วที่ได้จากทราย

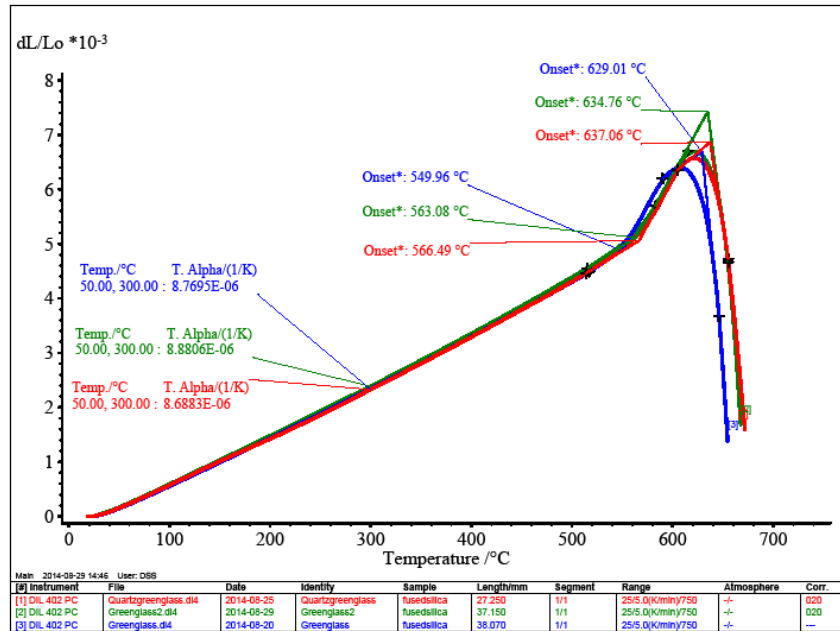


รูปที่ ค-3 ค่าความหนืดของแก้วที่ได้จากควอตซ์



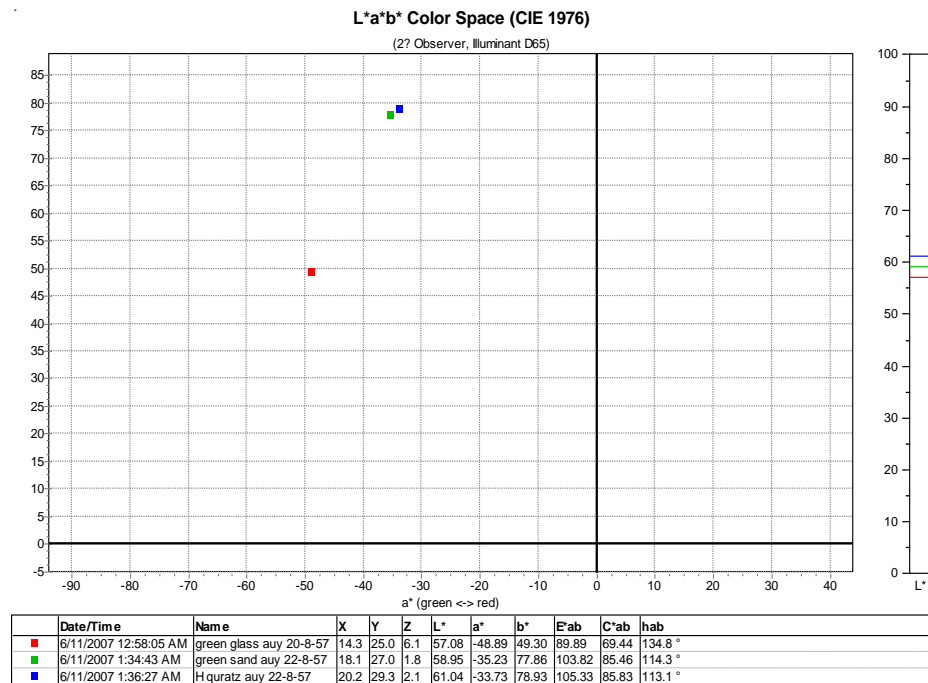
ภาคผนวก ง

รูปที่ ง-1 ค่าสมบัติทางความร้อนที่ได้จากเครื่อง Dilatometer



ภาคผนวก จ

รูปที่ จ-1 ค่าสีในระบบ CIE L*a*b



ภาคผนวก ฉ

รูปที่ ฉ-1 ค่าองค์ประกอบทางเคมีของแก้วที่ใช้ทรายที่ได้จากโปรแกรม glass cal

Batch Calculation Report

12/8/2014 11:58:00 AM

User Info:
Batch Info:

Oxide	Set (wt%)	Final	Raw Material	Batch	Glass	Sand
SiO2	62.00000	61.66349	lime stone <Auy>	22.70656	278.43478	44.64108
TiO2		0.04347	Sand<Auy>	50.63766	620.93677	100.00000
Al2O3		0.33640	Soda ash<Auy>	26.66558	326.66981	52.63963
Fe2O3		0.07241				
CaO	16.00000	15.66962				
MgO		0.11392				
Na2O	22.00000	21.66491				
K2O		0.08769				
SO3		0.11930				
Sum	100.00000	100.00000	Sum of Batch	100.00000	1226.23036	197.48071
			Glass	81.66075	1000.00000	161.04699
			Gases	18.44925	226.23036	36.43372

Corrections:

Redox No.: 0.00 Yield: 81.66% Price/Ton of Glass: 0.00

Glass Properties

Characteristic Temperatures (C)

Melting Temperature	1081.1
Soft Temperature	915.2
Working Temperature	811.8
Einsink Point	794.0
Flow Point	741.1
Littleton Point	631.5
Dilatometric Softening Point	553.5
Practical Annealing Point	551.2
Glass Transition Temperature	531.2
Strain Point	515.4
Liquidus Temperature	553.8

Workability Indices

Length of Glass	180.2
Working Range Index	100.4
Devitrification Index	59.6-
Relative Machine Speed	1.006

Crystallization

Max. Crystallization Temp.	824.0
Max. Growth Rate (m/min)	13.79
Viscosity Values (Pa s)	
Temperature (C)	log Viscosity
960	1.743
900	2.123
860	2.581
800	3.144
760	3.664

Chemical Property

Water Solubility (mg Na2O per 50 ml H2O)	1.66
--	------

Optical Properties

Refractive Index	1.5406
Dispersion	0.00966

Physical Properties

Density (g/cm ³)	2.6212
Exp. Coeff. (10 ⁻⁶ /C)	12.86
Surface Tension at 900 C (mN/m)	321.7

รูปที่ ฉ-2 ค่าองค์ประกอบทางเคมีของแก้วที่ใช้ควอตซ์ที่ได้จากโปรแกรม glass cal

Batch Calculation Report

12/8/2014 12:01:14 PM

User Info:

Batch Info:

Oxide	Set (wt%)	Final	Raw Material	Batch	Glass	Sand
SiO2	62.00000	61.75382	lime stone <Auy>	22.73298	278.54880	44.85481
Al2O3		0.30441	quartz <Auy>	50.66126	621.22611	100.00000
Fe2O3		0.13463	Soda ash<Auy>	26.66576	325.87618	52.45676
CaO	16.00000	15.91890				
MgO		0.11387				
BaO		0.01242				
Na2O	22.00000	21.69270				
K2O		0.08137				
SO3	0.20000	0.08798				
Sum	100.20000	100.00000	Sum of Batch	100.00000	1225.75110	197.31199
			Glass	61.66263	1000.00000	160.97199
			Gases	18.41737	225.75110	36.33980

Corrections:

Redox No.: 0.00

Yield: 61.66%

Price/Ton of Glass: 0.00

Glass Properties

Characteristic Temperatures (C)

Melting Temperature	1063.5
Soft Temperature	917.3
Working Temperature	813.6
Einsink Point	795.8
Flow Point	742.7
Littalon Point	632.8
Dilatometric Softening Point	554.5
Practical Annealing Point	562.0
Glass Transition Temperature	532.0
Strain Point	516.3
Liquidus Temperature	668.1

Crystallization

Max. Crystallization Temp.	825.9
Max. Growth Rate (/min)	14.03
Viscosity Values (Pa s)	
Temperature (C)	log Viscosity
950	1.758
900	2.140
850	2.600
800	3.167
750	3.680

Optical Properties

Refractive Index	1.5411
Dispersion	0.00968

Physical Properties

Density (g/cm ³)	2.6212
Exp.Coeff. (10 ⁻⁶ /C)	12.83
Surface Tension at 900 C (mN/m)	322.1

Workability Indices

Length of Glass	180.8
Working Range Index	100.7
Devitrification Index	69.3-
Relative Machine Speed	1.011

Chemical Property

Water Solubility (mg Na2O per 50 ml H2O)	1.55
--	------

รูปที่ ฉ-3 ค่าองค์ประกอบทางเคมีของแก้วสีเขียวที่ใช้ทรายที่ได้จากโปรแกรม glass cal

Batch Calculation Report

12/8/2014 12:04:38 PM

User Info:
Batch Info:

Oxide	Set (wt%)	Final	Raw Material	Batch	Glass	Sand
SiO2	70.49000	70.39864	Barium carbonate (AUJ)	0.20080	2.32818	0.36451
TiO2	0.06000	0.07045	Chromium Oxide (AUJ)	0.15920	1.83435	0.28719
ZrO2	0.04000	0.03995	Dolomite<Auj>	5.88536	88.23968	10.88380
Al2O3	2.35000	2.34695	feldspar<Auj>	9.14514	108.03819	18.50132
Fe2O3	0.38000	0.37951	Iron Oxide (Fe2O3)	0.24590	2.85119	0.44839
Cr2O3	0.18000	0.17977	lime stone <Auj>	11.97533	138.86169	21.73901
CaO	10.55000	10.53632	Potassium Nitrate (AUJ)	0.85745	9.94194	1.55654
MgO	1.25000	1.25839	Sand<Auj>	55.06580	638.72130	100.00000
BaO	0.22000	0.21971	Soda ash<Auj>	16.41051	190.27686	29.79028
SiO		0.00750	Zirconium Oxide (AUJ)	0.03451	0.40016	0.06285
Na2O	13.55000	13.55875				
K2O	0.87000	0.86890				
P2O5		0.04772				
SO3	0.05000	0.05744				
Sum	100.00000	100.00000	Sum of Batch	100.00000	1159.48153	181.53189
			Glass	86.24544	1000.00000	156.56281
			Gases	13.75456	159.48153	24.96888

Corrections:

Redox No.: 2.23 Yield: 86.25% Price/Ton of Glass: 0.00

Glass Properties

Characteristic Temperatures (C)

Melting Temperature	1444.2
Soft Temperature	1188.5
Working Temperature	1024.5
Einsink Point	995.0
Flow Point	910.2
Litton Point	729.7
Dilatometric Softening Point	598.5
Practical Annealing Point	590.5
Glass Transition Temperature	560.5
Strain Point	533.7
Liquidus Temperature	1061.9

Workability Indices

Length of Glass	294.7
Working Range Index	159.2
Devitrification Index	9.2
Relative Machine Speed	1.122

Crystallization

Max. Crystallization Temp.	943.4
Max. Growth Rate (m/min)	4.12
Viscosity Values (Pa s)	
Temperature (C)	log Viscosity
950	3.614
900	4.108
850	4.657
800	5.378
750	6.210

Chemical Property

Water Solubility (mg Na2O per 50 ml H2O)	0.48
--	------

Optical Properties

Refractive Index	1.5183
Dispersion	0.00882

Physical Properties

Density (g/cm ³)	2.5253
Exp.Coeff. (10 ⁻⁶ /C)	9.48
Surface Tension at 800 C (mN/m)	335.0

รูปที่ ฉ-4 ค่าองค์ประกอบทางเคมีของแก้วสีเขียวที่ใช้ควอตซ์ที่ได้จากโปรแกรม glass cal

Batch Calculation Report

12/8/2014 12:03:52 PM

User Info:

Batch Info:

Oxide	Set (wt%)	Final	Raw Material	Batch	Glass	Sand
SiO2	70.49000	70.44401	Barium carbonate AUJY	0.18905	2.19122	0.34381
TiO2	0.06000	0.06996	Chromium Oxide (AUJY)	0.15837	1.83664	0.28800
ZrO2	0.04000	0.03997	Dolomite<Auj>	5.89159	88.28592	10.71427
Al2O3	2.35000	2.34847	feldspar<Auj>	9.30229	107.81723	16.91886
Fe2O3	0.39000	0.37975	Iron Oxide (Fe2O3)	0.19089	2.21248	0.34716
Cr2O3	0.18000	0.17988	lime stone <Auj>	11.92565	138.22300	21.88780
CaO	10.66000	10.64312	Potassium Nitrate (AUJY)	0.86987	9.96624	1.56373
MgO	1.26000	1.25919	quartz <Auj>	54.98830	637.33644	100.00000
BaO	0.22000	0.21986	Soda ash<Auj>	16.43002	190.43064	29.87912
SiO		0.00706	TiO2 AUJY	0.02943	0.34112	0.05362
Na2O	13.66000	13.64609	Zirconium Oxide (AUJY)	0.03454	0.40028	0.06280
K2O	0.87000	0.86943				
P2O5		0.04866				
SO3	0.06000	0.06667				
Sum	100.00000	100.00000	Sum of Batch	100.00000	1169.04000	181.86666
			Glass	86.27930	1000.00000	166.90300
			Gases	13.72170	169.04000	24.96366

Corrections:

Redox No.: 1.74

Yield: 86.28%

Price/Ton of Glass: 0.00

Glass Properties

Characteristic Temperatures (C)

Melting Temperature	1444.6
Soft Temperature	1188.9
Working Temperature	1024.8
Einsink Point	995.2
Flow Point	910.5
Littleton Point	729.9
Dilatometric Softening Point	698.6
Practical Annealing Point	690.6
Glass Transition Temperature	660.6
Strain Point	633.8
Liquidus Temperature	1061.7

Workability Indices

Length of Glass	294.8
Working Range Index	189.3
Devitrification Index	9.3
Relative Machine Speed	1.123

Crystallization

Max. Crystallization Temp.	943.6
Max. Growth Rate (m/min)	4.25
Viscosity Values (Pa s)	
Temperature (C)	log Viscosity
960	3.616
900	4.110
850	4.690
800	5.379
750	6.214

Chemical Property

Water Solubility (mg Na2O per 50 ml H2O)	0.48
--	------

Optical Properties

Refractive Index	1.5186
Dispersion	0.00881

Physical Properties

Density (g/cm ³)	2.5252
Exp. Coeff. (10 ⁻⁶ /C)	9.48
Surface Tension at 900 C (mN/m)	335.2

ภาคผนวก ข

รูปที่ ข-1 องค์ประกอบทางเคมีของขวดแก้ว

Eval2 V2 0.295 Admin 9/29/2014 9:11:31 AM
 Sample: Auy_green glass_21-08-57
 Measured on 8/21/2014 8:22:16 AM
 Sample measured by Admin
 Measurement method: Best Detection-Vac34mm

Sum	Compton	O	Na2O	MgO	Al2O3
0.9761	139.1 KCps	5.5 KCps	80.5 KCps	15.7 KCps	22.7 KCps
	101.003 %	46.04 %	13.5360 %	1.2622 %	2.3500 %

SiO2	P2O5	SO3	K2O	CaO	TiO2
694.6 KCps	0.1 KCps	0.8 KCps	22.0 KCps	245.1 KCps	1.4 KCps
70.44 %	0.0150 %	0.0535 %	0.8695 %	10.5481 %	0.0626 %

Cr2O3	MnO	Fe2O3	ZrO2	BaO	PbO
8.1 KCps	1.3 KCps	36.7 KCps	47.2 KCps	2.2 KCps	10.5 KCps
0.1786 %	0.02 %	0.3753 %	0.0396 %	0.2230 %	0.03 %

รูปที่ ข-2 องค์ประกอบทางเคมีของแก้วที่ได้มาจากทราย

Eval2 V2 0.295 Admin 9/1/2014 9:16:46 AM
 Sample: Auy_green sand-22-8-57
 Measured on 8/22/2014 4:00:26 PM
 Sample measured by Admin
 Measurement method: Best Detection-Vac34mm

Sum	Compton	O	Na2O	MgO	Al2O3
0.9744	139.3 KCps	5.6 KCps	76.6 KCps	19.4 KCps	21.9 KCps
	102.805 %	46.27 %	12.8545 %	1.5393 %	2.2539 %

SiO2	P2O5	SO3	K2O	CaO	TiO2
705.6 KCps	0.3 KCps	0.6 KCps	20.8 KCps	244.3 KCps	1.9 KCps
71.13 %	0.0397 %	0.0421 %	0.8194 %	10.4852 %	0.0889 %

Cr2O3	Fe2O3	BaO
7.7 KCps	36.7 KCps	2.2 KCps
0.1688 %	0.3548 %	0.2289 %

รูปที่ ข-3 องค์ประกอบทางเคมีของแก้วที่ได้มาจากควอตซ์

Eval2 V2.0 295 Admin 9/1/2014 9:16:09 AM
 Sample: Auy_H quartz-22-8-57
 Measured on 8/22/2014 4:19:32 PM
 Sample measured by Admin
 Measurement method: Best Detection-Vac34mm

Sum	Compton	O	Na2O	MgO	Al2O3
0.9814	141.3 KCps	5.5 KCps	73.7 KCps	22.3 KCps	23.0 KCps
	99.665 %	46.24 %	12.4870 %	1.7848 %	2.3900 %

SiO2	P2O5	SO3	K2O	CaO	TiO2
696.6 KCps	0.3 KCps	0.6 KCps	21.8 KCps	252.4 KCps	1.9 KCps
70.74 %	0.0410 %	0.0434 %	0.8665 %	10.9215 %	0.0883 %

Cr2O3	Fe2O3	ZrO2	BaO
7.4 KCps	28.1 KCps	40.6 KCps	1.6 KCps
0.1633 %	0.2754 %	0.0343 %	0.1619 %



ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายภาสกร คงชม เกิดวันที่ 6 กันยายน พ.ศ. 2532 ที่จังหวัดภูเก็ต สำเร็จการศึกษา ระดับปริญญาตรี หลักสูตรวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ในปี พ.ศ. 2555 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิตหลักสูตรเทคโนโลยีเซรามิก ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปี พ.ศ. 2555 และสำเร็จการศึกษาในปีการศึกษาปี 2557

นำเสนอผลงานทางวิชาการระดับนานาชาติแบบ Poster presentation เรื่อง “Replacement of silica sand in soda lime glasses by quartz” ในการประชุมทางวิชาการ The 9th Mathematic and Physicals Science Graduate Congress (MPSGC) ระหว่างวันที่ 8-10 มกราคม 2557 จัดโดย University of Malaya

นำเสนอผลงานทางวิชาการระดับนานาชาติแบบ Poster presentation เรื่อง “Properties of sand replacement soda lime glasses” ในการประชุมทางวิชาการ The Annual Conference on Engineering and Technology (ACEAT 2014) ระหว่างวันที่ 15-17 ตุลาคม พ.ศ. 2557 และได้รับการตีพิมพ์ผลงานแบบ Proceeding