

การหาอนุหมูลิควิตส์ของแก้วฐานบะซอลต์สำหรับการขึ้นรูปเส้นใย



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 2560
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DETERMINATION OF LIQUIDUS TEMPERATURE OF BASALT BASED GLASSES
FOR FIBER FORMING

Miss Napaporn Vaiborisut



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 2017

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การหาอุณหภูมิวิกฤตของแก้วฐานบะซอลต์สำหรับการขึ้นรูปเส้นใย
โดย	นางสาวนภาพร ้วยบริสุทธิ์
สาขาวิชา	เทคโนโลยีเซรามิก
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	อาจารย์ ดร.อภิรัฐ อธิภาวิเศษพงษ์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริฉันทน์ เจริญศิริเลิศ

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กานต์ เสรีวัลย์สถิตย์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(อาจารย์ ดร.อภิรัฐ อธิภาวิเศษพงษ์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริฉันทน์ เจริญศิริเลิศ)

.....กรรมการ
(อาจารย์ ดร.ณัฐพล แรงทน)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.อนุชา วรรณก้อน)

นภาพร ้วยบริสุทธิ์ : การหาอุณหภูมิวิกฤตของแก้วฐานบะซอลต์สำหรับการขึ้นรูปเส้นใย (DETERMINATION OF LIQUIDUS TEMPERATURE OF BASALT BASED GLASSES FOR FIBER FORMING) อ.ที่ปริกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อาจารย์ ดร.อภิรัฐ ธีรภาพวิเศษพงษ์, อ.ที่ปริกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ผศ. ดร.ศิริฉันทน์ เจียมศิริเลิศ, 79 หน้า.

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลขององค์ประกอบเคมีต่ออุณหภูมิวิกฤตของแก้วฐานบะซอลต์ในระบบ $\text{SiO}_2\text{-CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO-Fe}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O-K}_2\text{O}$ สำหรับการดึงเป็นเส้นใย ผ่านการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายอุณหภูมิวิกฤตที่สัมพันธ์กับส่วนผสมแก้ว โดยใช้ข้อมูลจากการวัดอุณหภูมิวิกฤตด้วยเทคนิค DTA และ isothermal ของแก้วฐานบะซอลต์จำนวน 30 สูตร แก้วถูกเตรียมจากวัตถุดิบหลักคือ หินบะซอลต์จากแหล่งหินในอำเภอชัยบาดาล จังหวัดลพบุรี ทำการแปรส่วนผสมโดยวิธี Extreme Vertices Design ส่วนผสมถูกหลอมที่อุณหภูมิ 1450 องศาเซลเซียส และทำให้เย็นตัวอย่างฉับพลันในน้ำ ผลการวัดอุณหภูมิวิกฤตของแก้วด้วยเทคนิค DTA และ Isothermal พบว่าทั้งสองวิธีได้อุณหภูมิใกล้เคียงกันโดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ เท่ากับ 0.91 โดยอุณหภูมิวิกฤตของแก้วที่อยู่ในช่วงส่วนผสมเส้นใยบะซอลต์มีค่าระหว่าง 1190 – 1360 องศาเซลเซียส การผ่านกระบวนการทางความร้อนเพื่อให้แก้วตกผลึกพบว่าแก้วแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม คือกลุ่มที่มีเฟสผลึกหลักเป็นไดออปไซด์ และกลุ่มแอลไบต์ การทำนายอุณหภูมิวิกฤตด้วยวิธีวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณจึงแบ่งเป็น 2 สมการ ตามเฟสผลึกหลักดังกล่าว ผลการพิจารณาเปรียบเทียบอุณหภูมิวิกฤตที่ได้จากการคำนวณตามแบบจำลองที่สร้างขึ้นกับผลการวัดอุณหภูมิวิกฤตทั้ง 2 วิธี พบค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจมีค่า ระหว่าง 0.72 - 0.82 ซึ่งบ่งชี้ว่าแบบจำลองนี้สามารถนำไปใช้ในการคำนวณหาอุณหภูมิวิกฤตของแก้วในระบบนี้ในระดับที่ยอมรับได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาควิชา	วัสดุศาสตร์	ลายมือชื่อนิสิต
สาขาวิชา	เทคโนโลยีเซรามิก	ลายมือชื่อ อ.ที่ปริกษาหลัก
ปีการศึกษา	2560	ลายมือชื่อ อ.ที่ปริกษาร่วม

5871973423 : MAJOR CERAMIC TECHNOLOGY

KEYWORDS: LIQUIDUS TEMPERATURE / BASALTIC GLASSES / DESIGN EXPERIMENT / MATHEMATICAL MODELING

NAPAPORN VAIBORISUT: DETERMINATION OF LIQUIDUS TEMPERATURE OF BASALT BASED GLASSES FOR FIBER FORMING. ADVISOR: APIRAT THEERAPAPVISETPONG, Ph.D., CO-ADVISOR: ASST. PROF. SIRITHAN JIEMSIRILERS, Ph.D., 79 pp.

In this work, the effect of chemical composition on the liquidus temperature of basaltic glasses within $\text{SiO}_2\text{-CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O-K}_2\text{O}$ system for fiber forming were studied by creating a mathematical modeling to predict the liquidus temperature which is depended on glass compositions. A sample of 30 glass formulas was determined its liquidus temperature by DTA and Isothermal technique. The measured liquidus from both techniques were used to create the mathematical model. Glass samples were prepared from the basalt rocks as a major material from Chai Badan, Lopburi, Thailand. Glass formulas were designed by Extreme Vertices Mixture Design. The glass batch was melted at 1450°C and quenched in the water. The result found that the measured liquidus temperature by DTA and Isothermal have similar value which the coefficient of determination is 0.91. The liquidus temperatures of basaltic glasses were between 1190 to 1360°C . The crystallization in glasses by heat treatment process could divide the glass sample into 2 groups. The first group is the glass that has diopside as the major crystalline phase and the second is that has albite as same ways. Therefore, the prediction of liquidus temperature with multiple regression analysis was divided into two models according to the major crystalline phase. The comparison of calculated liquidus temperatures from both prediction model showed that the coefficient of determination was between 0.72 - 0.82. Therefore, these prediction models were acceptable to predict the liquidus temperature of this basaltic glass system.

Department: Materials Science Student's Signature

Field of Study: Ceramic Technology Advisor's Signature

Academic Year: 2017 Co-Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ลุล่วงไปด้วยดี ดิฉันขอขอบพระคุณ ความช่วยเหลือ และสนับสนุนจากหลายภาคส่วนดังนี้

อาจารย์ ดร.อภิรัฐ อีรภาพิเศษพงษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริธันว์ เจียมศิริเลิศ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้ความรู้ คำปรึกษาเพื่อแก้ไขปัญหา และความช่วยเหลือในงานวิจัยนี้ รวมถึงมอบโอกาสและประสบการณ์ที่ดีให้

อาจารย์ภาควิชาวัสดุศาสตร์ทุกท่าน ที่ให้ความรู้ ความเมตตา ตลอดจนเจ้าหน้าที่บุคลากร และพี่ ๆ ในของภาควิชาวัสดุศาสตร์ ที่ให้ความช่วยเหลือในทุก ๆ ด้าน

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านที่ให้ความรู้ คำแนะนำต่าง ๆ เพื่อปรับปรุงแก้ไขวิทยานิพนธ์นี้ให้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ทุน 90 ปี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้การสนับสนุนค่าดำเนินงานวิจัย



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูป.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	1
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	1
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	2
2.1 หินบะชอลต์.....	2
2.2 เส้นใยบะชอลต์.....	4
2.3 สมบัติทางความร้อน.....	8
2.4 คำานวนอุณหภูมิวิกฤต.....	12
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	15
3.1 สารเคมีวัตถุดิบและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	15
3.1.1 สารเคมีและวัตถุดิบ.....	15
3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	16
3.1.3 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	16
3.2 ขั้นตอนการวิจัย.....	17
3.2.1 การเตรียมแก้วฐานบะชอลต์.....	17

3.2.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี (X-Ray Fluorescence, XRF)	19
3.2.3 การวิเคราะห์อุณหภูมิสภาพแก้ว (T_g), อุณหภูมิตกผลึก (T_c) และจุดยุติของอุณหภูมิ หลอมเหลว ($T_{Endpoint}$).....	20
3.2.4 การวัดอุณหภูมิคลิวิตัส (T_L).....	20
3.2.5 การตรวจสอบหาโครงสร้างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffraction, XRD)	22
3.2.6 คำนวณหาอุณหภูมิคลิวิตัส	23
3.3 แผนผังการทดลอง.....	24
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล.....	25
4.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของแก้ว.....	25
4.2 ผลการตรวจสอบองค์ประกอบทางเฟสด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	26
4.3 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน	34
4.3.1 ผลการวัด T_g , T_c และ $T_{Endpoint}$ ของแก้วด้วยเทคนิค DTA	34
4.3.2 ผลการวัด T_L ของแก้วด้วยเทคนิค DTA	35
4.3.3 ผลการวัด T_L ของแก้วด้วยวิธี Isothermal	36
4.4 คำนวณหา T_L	40
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	46
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	46
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	47
รายการอ้างอิง	48
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	79

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของหินบะซอลต์ที่สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้.....	3
ตารางที่ 2.2 สมบัติต่าง ๆ ของเส้นใยแต่ละประเภท.....	5
ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบทางเคมีของแก้วฐานบะซอลต์จากการออกแบบการทดลอง.....	17
ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของแก้วฐานบะซอลต์จาก XRF.....	25
ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเฟสของแต่ละสูตรแก้ว	26
ตารางที่ 4.3 ค่าอุณหภูมิสภาพแก้ว (T_g) อุณหภูมิตกผลึก (T_c) จุดยุติ (T_{Endpoint}) และ อุณหภูมิ ลิควิดัส (T_L) จาก DTA และ Isothermal.....	38
ตารางที่ 4.4 ค่าสัมประสิทธิ์ขององค์ประกอบ (b _i) ของเทคนิค DTA และ Isothermal.....	40
ตารางที่ 4.5 ค่า T_L ที่ได้จากคำนวณของสูตรแก้วที่มีเฟสไดออกไซด์เป็นเฟสหลัก	42
ตารางที่ 4.6 ค่า T_L ที่ได้จากคำนวณของสูตรแก้วที่มีเฟสแอลไบต์เป็นเฟสหลัก	44

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 แบบจำลองการเกิดหินบะซอลต์ และพื้นที่เนินเขาหินบะซอลต์ในจังหวัดลพบุรี.....	3
รูปที่ 2.2 การออกแบบการทดลองแบบ Extreme Vertices Design.....	4
รูปที่ 2.3 ผ้าใยแก้ว (fiberglass fabric) และแผ่นฉนวนกันความร้อน	5
รูปที่ 2.4 กระบวนการขึ้นรูปเส้นใยบะซอลต์.....	6
รูปที่ 2.5 กราฟ DSC (เส้นทึบ) และ TG (เส้นประ) ของเส้นใยที่มีเซอร์โคเนียแตกต่างกัน	8
รูปที่ 2.6 กราฟแสดงจุดของ T_g , T_c , T_m และ T_L	9
รูปที่ 2.7 แก้ว SGR ที่ผ่านการให้ความร้อนใน Gradient furnace ในช่วงอุณหภูมิ 872 – 921 องศาเซลเซียส	10
รูปที่ 2.8 กราฟ DCS แสดงค่าอุณหภูมิ T_g , T_c และ T_m ของเส้นใย.....	12
รูปที่ 2.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิลิควิดัสที่ได้จากการคำนวณ และเทคนิค gradient temperature furnace ของกลุ่มของเฟสเนฟิไลน และโวลาสโทไนต์.....	14
รูปที่ 3.1 แก้วพริตที่เตรียมได้.....	18
รูปที่ 3.2 อิเล็กตรอนในชั้น K หลุด และอิเล็กตรอนในชั้น M ที่มีพลังงานสูงกว่าลงมาแทนที่.....	19
รูปที่ 3.3 ผงแก้วที่ผ่านการอัดขึ้นรูปเป็นเม็ด.....	20
รูปที่ 3.4 เตา Bottom loading	21
รูปที่ 3.5 ชิ้นงานสำหรับการวัดอุณหภูมิลิควิดัสด้วยวิธี Isothermal	22
รูปที่ 3.6 แผนผังการทดลอง.....	24
รูปที่ 4.1 องค์ประกอบทางเฟสของแก้วฐานบะซอลต์สูตรที่ 1 - 5.....	28
รูปที่ 4.2 องค์ประกอบทางเฟสของแก้วฐานบะซอลต์สูตรที่ 6 – 10.....	29
รูปที่ 4.3 องค์ประกอบทางเฟสของแก้วฐานบะซอลต์สูตรที่ 11 – 15.....	30
รูปที่ 4.4 องค์ประกอบทางเฟสของแก้วฐานบะซอลต์สูตรที่ 16 – 20.....	31
รูปที่ 4.5 องค์ประกอบทางเฟสของแก้วฐานบะซอลต์สูตรที่ 21 – 25.....	32

รูปที่ 4.6 องค์ประกอบทางเฟสของแก้วฐานอะซอลต์สูตรที่ 26 – 30.....	33
รูปที่ 4.7 กราฟ DTA แสดงค่า T_g T_c $T_{Endpoint}$ ของแก้วฐานอะซอลต์สูตรที่ 1 - 5	34
รูปที่ 4.8 กราฟ DTA แสดงค่า T_L ของแก้วฐานอะซอลต์สูตรที่ 1 - 5.....	35
รูปที่ 4.9 ตัวอย่างแก้วสูตร BG 3 และBG 7	36
รูปที่ 4.10 กราฟเปรียบเทียบ T_L จากเครื่อง DTA และวิธี Isothermal.....	38
รูปที่ 4.11 กราฟเปรียบเทียบ T_L ที่ได้จากการวัดด้วยเทคนิค DTA และคำนวณของสูตรแก้ว ที่มีเฟสไดออกไซด์เป็นเฟสหลัก	43
รูปที่ 4.12 กราฟเปรียบเทียบ T_L ที่ได้จากการวัดด้วยเทคนิค Isothermal และคำนวณของสูตรแก้ว ที่มีเฟสไดออกไซด์เป็นเฟสหลัก	44
รูปที่ 4.13 กราฟเปรียบเทียบ T_L ที่ได้จากการวัดด้วยเทคนิค DTA และคำนวณของสูตรแก้ว ที่มีเฟสแอลไบต์เป็นเฟสหลัก	45
รูปที่ 4.14 กราฟเปรียบเทียบ T_L ที่ได้จากการวัดด้วยเทคนิค Isothermal และคำนวณของสูตรแก้ว ที่มีเฟสแอลไบต์เป็นเฟสหลัก	45

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

หินบะซอลต์ (Basalt rock) ได้ถูกนำมาพัฒนาใช้ผลิตเป็นเส้นใยสำหรับวัสดุเชิงประกอบ (Composite materials) ในงานต่าง ๆ เพื่อทดแทนแร่ใยหินที่ถูกยกเลิกและห้ามใช้ด้วยเหตุผลอันตรายต่อสุขภาพ เนื่องจากหินบะซอลต์มีโครงสร้างทางเคมีคล้ายกับแก้ว (Glass) ซึ่งองค์ประกอบหลักทางเคมีประกอบด้วย SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , MgO และ Fe_2O_3 เมื่อนำมาขึ้นรูปเป็นเส้นใยจึงมีสมบัติเชิงกลที่ดี ทนต่อสารเคมี และเสถียรที่อุณหภูมิสูง การนำหินบะซอลต์มาขึ้นรูปเป็นเส้นใยนั้น ควรมีการศึกษาหาอุณหภูมิหลอมเหลว (Liquidus Temperature) เพื่อใช้ในการเลือกสูตรแก้วบะซอลต์ และวางแผนกระบวนการผลิตให้เหมาะสม อีกทั้งช่วยลดพลังงานในการผลิต

อุณหภูมิหลอมเหลว (Liquidus Temperature, T_L) มีความสำคัญต่ออุตสาหกรรมแก้วเป็นอย่างมาก เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ในการหลอมแก้วต่ำกว่า T_L อาจส่งผลให้ตกผลึก (devitrification) หรือหลอมวัสดุได้ไม่หมด ซึ่งในกระบวนการผลิตเส้นใยนั้น ไม่ควรเกิดการตกผลึกในขณะขึ้นรูป เพราะจะทำให้เกิดตำหนิเป็นสาเหตุทำให้เกิดการแตกหักและสมบัติบางอย่างเปลี่ยนไป ซึ่งการวัดอุณหภูมิหลอมเหลวสามารถหาได้จากการวัดด้วยเตาเกรเดียนท์ (gradient furnace method) กระบวนการให้ความร้อนที่อุณหภูมิคงที่ (Isothermal process) หรือ เทคนิคการวิเคราะห์หาค่าการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนด้วยเครื่อง Differential Thermal Analysis, DTA

ในงานวิจัยนี้ ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิหลอมเหลวและองค์ประกอบทางเคมีของแก้วฐานบะซอลต์สำหรับการขึ้นรูปเป็นเส้นใย โดยวัดอุณหภูมิหลอมเหลวจากเครื่อง DTA และกระบวนการให้ความร้อนที่อุณหภูมิคงที่ และสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายอุณหภูมิหลอมเหลวของแก้วฐานบะซอลต์โดยใช้ข้อมูลจากการวัดทั้งสองวิธี

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิหลอมเหลวและองค์ประกอบทางเคมีของแก้วฐานบะซอลต์สำหรับการขึ้นรูปเป็นเส้นใย

1.2.2 สร้างแบบจำลองเพื่อทำนายอุณหภูมิหลอมเหลวของแก้วฐานบะซอลต์โดยใช้ข้อมูลจากการวัดด้วยกระบวนการให้ความร้อนที่อุณหภูมิคงที่ และจากกราฟ DTA

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้แบบจำลองที่สามารถทำนายอุณหภูมิหลอมเหลวของแก้วฐานบะซอลต์สำหรับการขึ้นรูปเส้นใย

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 หินบะซอลต์

หินบะซอลต์ (Basalt rock)^[1, 2] เป็นหินอัคนีพุ (extrusive rock) หรือหินภูเขาไฟ (volcanic Rock) เกิดจากการเย็นตัวลงอย่างรวดเร็วของหินหนืดที่ดันตัวออกมาบนผิวโลกเป็นลาวา กลายเป็นหินที่มีลักษณะเนื้อแน่นละเอียด มีรูพรุน สีเทาเข้มถึงดำ ในประเทศไทย พบมากที่จังหวัดศรีสะเกษ ลำปาง กาญจนบุรี จันทบุรี และลพบุรี^[3] องค์ประกอบหลักทางเคมีประกอบด้วย SiO_2 Al_2O_3 CaO MgO Fe_2O_3 Na_2O และ K_2O แร่ที่พบในหินบะซอลต์ ได้แก่ แร่ไพโรซีน (pyroxene) แร่พลาจิโอเคลส (plagioclase) อาจมีแร่โอลิวีน (olivine) ปนมาด้วย เนื่องจากเกิดขึ้นจากแมกมาใต้เปลือกโลก^[4] มีอุณหภูมิหลอมเหลวอยู่ในช่วง 1450-1700 องศาเซลเซียส หินบะซอลต์แบ่งออกเป็น 4 กลุ่มคือ หินบะซอลต์โทไลอิตกึ่งแอลคาไลน์ (tholeiitic or sub-alkaline basalt) หินบะซอลต์แคลก์-แอลคาไลน์ (calc-alkaline basalt) หินบะซอลต์โคมาทิไต์ (komatiite basalt) และ หินบะซอลต์แอลคาไลน์ (alkaline basalt) โดยหินบะซอลต์ที่พบในประเทศไทยมักเป็นพวก หินบะซอลต์แอลคาไลน์หรือชนิดต่าง ซึ่งหินบะซอลต์แต่ละชนิดที่พบได้นั้นแปรไปตามสภาพพื้นที่เกิด และลักษณะการเย็นตัว

หินบะซอลต์ที่นำมาใช้ในงานวิจัยนำมาจากหลุมเจาะในเขตสัมปทานของ บริษัท ไมน์เค็ม จำกัด อ.ชัยบาดาล จ.ลพบุรี ประเทศไทย ซึ่งเป็นหินบะซอลต์ชนิดโทไลอิตกึ่งแอลคาไลน์ ที่เกิดจากการปะทุของลาวา ที่พบได้ 2 แบบ คือ ปะทุขึ้นมาจากปล่องภูเขาไฟ และปะทุขึ้นตามรอยแตกยาว ๆ บนผิวโลก โดยลาวาที่ปะทุจากรอยแตกเหล่านี้ทำให้เกิดลักษณะภูมิประเทศแบบที่ราบสูงเช่นเดียวกับพื้นที่ของจังหวัดลพบุรี^[4] ดังแสดงในรูปที่ 2.1 มีปริมาณของซิลิการ้อยละ 52 - 65 และมีปริมาณของเหล็กออกไซด์ อะลูมิเนียมออกไซด์สูง องค์ประกอบทางเฟสได้แก่ เฟสไดออปไซด์ (diopside; $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$) เฟสแอลไบต์ (albite; $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) และเฟสอะนอร์ไทต์ (anorthite; $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) เป็นเฟสหลัก ซึ่งปริมาณซิลิกาที่มีมากนั้นจะส่งผลต่อความหนืดในขณะหลอมหินบะซอลต์และทำให้ยากต่อการขึ้นรูปเป็นเส้นใย จึงอาจมีการปรับองค์ประกอบทางเคมีก่อนนำไปใช้งาน

ส่วนใหญ่หินบะซอลต์เป็นที่นิยมนำมาใช้ในการประดับสวน และก่อสร้าง เนื่องจากมีรูพรุน และมีความแข็งแรงต่อการสึกกร่อน ต่อมาได้มีการนำหินบะซอลต์มาพัฒนาใช้ผลิตเป็นเส้นใยสำหรับวัสดุเชิงประกอบ (composite materials)^[5] ในงานต่าง ๆ เพื่อทดแทนแร่ใยหิน (asbestos)^[6, 7] เนื่องจากเป็นแร่ที่มีอันตรายต่อระบบทางเดินหายใจ จัดกลุ่มเป็นสารก่อมะเร็งในมนุษย์ อีกทั้งยังมีสมบัติเทียบเท่า คือ มีความแข็งแรง มีความยืดหยุ่นสูง ทนต่อความร้อน ทนต่อแรงดึง และทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมี^[8, 9]



รูปที่ 2.1 แบบจำลองการเกิดหินบะซอลต์ และพื้นที่เนินเขาหินบะซอลต์ในจังหวัดลพบุรี^[4]

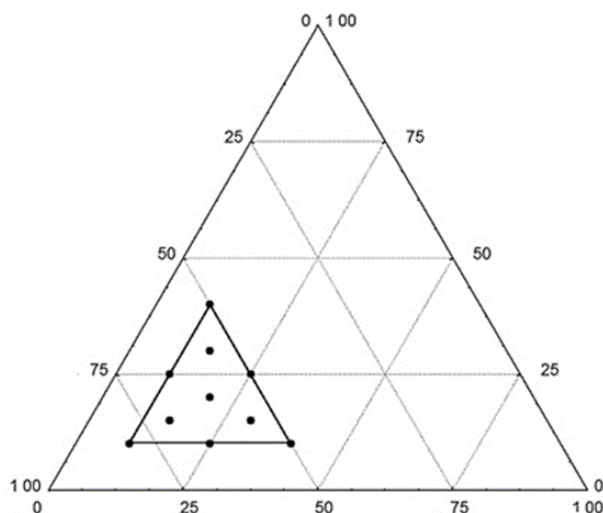
องค์ประกอบสำคัญทางเคมีของหินบะซอลต์ที่สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้แสดงดังตารางที่ 2.1^[10] ซึ่งปริมาณซิลิกาอยู่ในช่วงร้อยละ 42 - 55 ในขณะที่ปริมาณซิลิกาของหินบะซอลต์ที่พบในประเทศไทยมีปริมาณมากกว่าร้อยละ 55 ส่งผลให้ค่าความหนืด หรือการไหลตัวสูง ทำให้การขึ้นรูปเส้นใยทำได้ยาก^[11]

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของหินบะซอลต์ที่สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้^[4]

องค์ประกอบทางเคมี	ปริมาณ (ร้อยละน้ำหนัก)
SiO ₂	42.43 - 55.69
CaO	7.43 - 12
Al ₂ O ₃	11 - 17.97
MgO	4.06 - 11
Fe ₂ O ₃	5 - 11.68
Na ₂ O	2.38 - 5
K ₂ O	1.06 - 5
TiO ₂	1.10 - 5

ทั้งนี้หินบะซอลต์ในแต่ละพื้นที่มีองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกัน ก่อนนำมาใช้งานในกระบวนการหลอมแก้ว จึงมีการออกแบบการทดลองแบบผสม (Extreme Vertices Design)^[12, 13] ซึ่งเป็นการออกแบบการทดลองในพื้นที่ที่สนใจจากทั้งหมด ดังรูปที่ 2.2 มีการกำหนดค่าขอบล่าง (lower) - ขอบบน (upper) ของแต่ละปัจจัย โดยผลรวมของทั้งหมดเท่ากับ 1 หรือ 100% ในแต่ละ

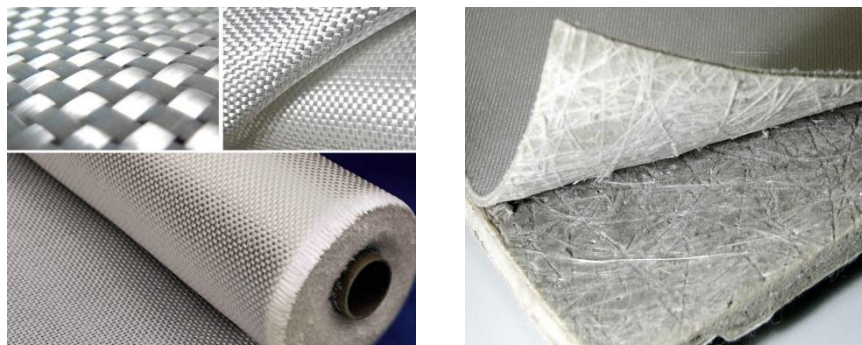
ปัจจัยนั้นไม่จำเป็นต้องมีค่าขอบล่าง – ขอบบน เท่ากับ 0 - 100% โดยเป็น 15 - 45% (0.15 - 0.45) เป็นต้น เนื่องจากความต้องการในการออกแบบการทดลองเพื่อนำมาใช้จริง



รูปที่ 2.2 การออกแบบการทดลองแบบ Extreme Vertices Design^[13]

2.2 เส้นใยปะชอลต์

เส้นใยแก้ว หรือไฟเบอร์กลาส (fiber glass)^[14] เป็นวัสดุที่ได้จากกระบวนการหลอมแก้ว แล้วดึงออกมาจากน้ำแก้วกลายเป็นเส้นใย โดยมีลักษณะหลายรูปแบบแตกต่างกัน ขึ้นกับรูปแบบในการนำไปใช้งาน เช่น นำเส้นใยที่มีขนาดเล็กมาทอเป็นผืนเหมือนผ้า (fiberglass fabric) รูปที่ 2.2 ผ้าที่ได้จะไม่ดูดซึมน้ำ ไม่หดตัว ป้องกันความร้อนได้ดี ส่วนมากนำมาใช้เป็นการทำเป็นผ้าปูกันสะเก็ดไฟในอุตสาหกรรม หรือเส้นใยที่ถูกตัดให้เป็นเส้นสั้น ๆ เพื่อใช้เป็นส่วนผสมเสริมความแข็งแรงให้กับวัสดุกลุ่มพอลิเมอร์ มักนำมาใช้ทำเป็นฉนวนกันความร้อน (รูปที่ 2.2) หรือแผ่นหลังคาโปร่งแสง นอกจากนี้เส้นใยแก้วยังถูกนำมาใช้ประโยชน์ในด้านอื่น ๆ อีกมากมาย เนื่องจากเส้นใยแก้วมีสมบัติความแข็งแรงทนแรงดึงได้สูง ไม่เป็นสนิม และทนต่อการกัดกร่อน นอกจากนี้เส้นใยแก้วยังมีสมบัติด้านการเป็นฉนวนความร้อนที่ดีเหมาะที่จะนำมาใช้เป็นฉนวนในเตา ตู้เย็น หรือวัสดุก่อสร้างอีกด้วย



รูปที่ 2.3 ผ้าใยแก้ว (fiberglass fabric) และแผ่นฉนวนกันความร้อน^[15]

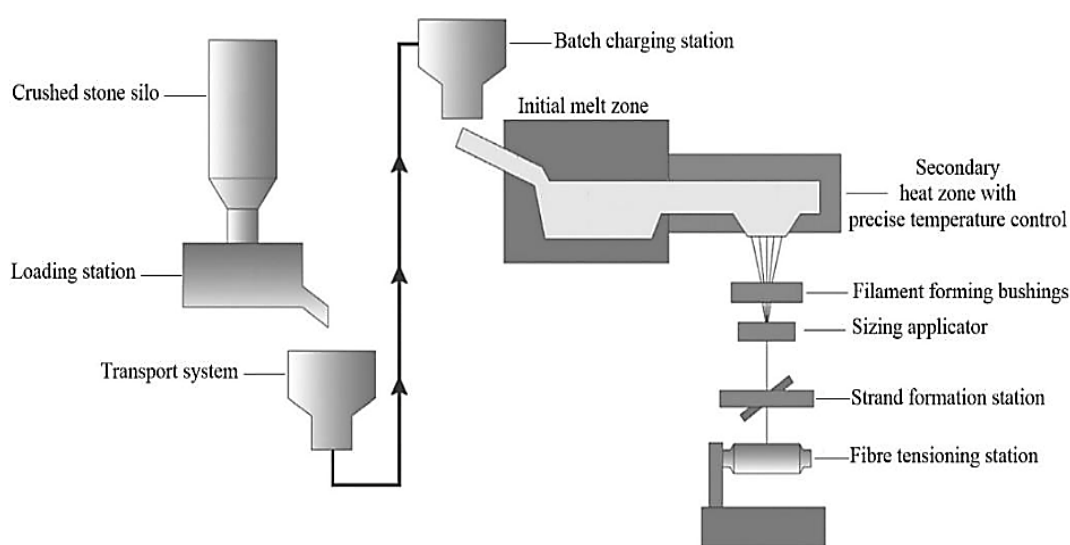
โดยทั่วไปเส้นใยแก้วแบ่งออกเป็น A-glass (alkali) ใช้สำหรับงานที่ต้องการทนสารเคมีที่เป็นด่าง, C-glass (chemical) ใช้สำหรับงานที่ต้องการทนสารเคมีที่เป็น กรด และสารกัดกร่อน, E-glass (electrical) ใช้สำหรับงานที่ต้องการรับแรง และเป็นฉนวนป้องกันกระแสไฟฟ้าได้ดี และ S-glass (high Strength) ใช้สำหรับงานที่ต้องการรับแรงสูงกว่าชนิด E-glass นอกจากนี้ยังมีเส้นใยคาร์บอน (carbon fiber) ใช้สำหรับงานที่รับแรงกระแทก จึงถูกนำมาใช้เป็นส่วนผสมในวัสดุเสริมแรงสำหรับ ส่วนประกอบเครื่องบิน หรือรถยนต์ แต่มีราคาแพง และเส้นใยบะซอลต์ (basalt fiber)^[10, 16] คล้าย กับเส้นใยคาร์บอน แต่รับแรงกระแทกได้น้อย และมีราคาถูก ในตารางที่ 2.2^[16] แสดงถึงสมบัติต่าง ๆ ของเส้นใยแต่ละประเภท จะเห็นได้ว่าเส้นใยคาร์บอนสามารถรับแรงกระแทกสูง และทนต่อความร้อน สูงกว่าเส้นใยชนิดอื่น ๆ แต่ด้วยเครื่องมืออุปกรณ์สำหรับการขึ้นรูปมีราคาสูง ส่งผลให้เส้นใยคาร์บอน มีราคาสูง จึงมีการนำหินบะซอลต์เข้ามาผลิตเป็นเส้นใยแก้ว เนื่องจากมีสมบัติใกล้เคียงกับเส้นใย คาร์บอน ทนต่อแรงกระแทกได้น้อยกว่าเส้นใยคาร์บอน แต่มากกว่าเส้นใยแก้วชนิดอื่น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.2 สมบัติต่าง ๆ ของเส้นใยแต่ละประเภท^[16]

สมบัติ	เส้นใยบะซอลต์ (Basalt fiber)	เส้นใยคาร์บอน (Carbon fiber)	ใยแก้วชนิด E-glass	ใยแก้วชนิด S-glass
Breaking Strength (MPa)	3000-4000	3500-6000	3100-3800	4020-4650
Modulus of Elasticity (GPa)	79.3-93.1	230-600	72.5-75.5	83-86
Breaking Extension (%)	3.1	1.5-2.0	4.7	5.3
Temperature Withstand (°C)	-260 ถึง 700	-50 ถึง 700	-50 ถึง 380	-50 ถึง 300

การขึ้นรูปเส้นใย เริ่มจากบดผสมวัตถุดิบหลักได้แก่ทรายแก้ว หินปูน หินฟอสเฟต และสารเติมแต่งอื่น ๆ แล้วไหลลงในไซโล (silo) แล้วเข้าสู่กระบวนการหลอมเหลวภายในเตาหลอมที่อุณหภูมิสูง กลายเป็นน้ำแก้วและเข้าสู่กระบวนการรีดเป็นเส้นใยขนาดยาว เส้นใยจะถูกดึงออกจากหัวรีด และถูกม้วนรวมกันตามขนาดที่ต้องการ โดยเก็บด้วยความเร็วที่สูงกว่าความเร็วของใยแก้วที่รีดออกมา ซึ่งเป็นการยืดดึงในขณะที่เส้นใยยังอ่อนตัวก่อนเกิดการแข็งตัว เพื่อให้ได้เส้นใยที่มีขนาดเล็กออกมา ดังแสดงในรูปที่ 2.4^[10] เช่นเดียวกันกับการขึ้นรูปเส้นใยแก้วบะซอลต์ ที่ใช้หินบะซอลต์เป็นวัตถุดิบหลักในการขึ้นรูป

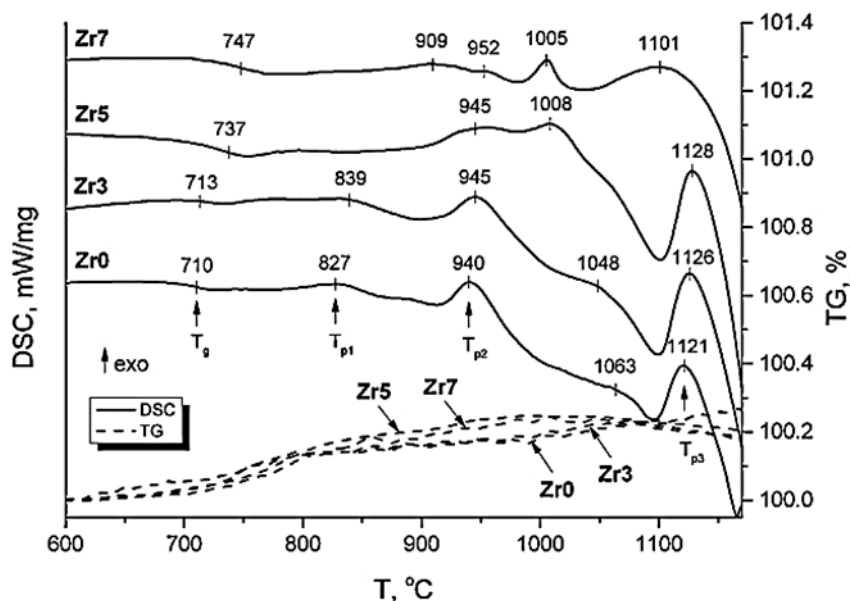


รูปที่ 2.4 กระบวนการขึ้นรูปเส้นใยบะซอลต์^[10]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

นอกจากนี้อาจมีการเติมสารประกอบออกไซด์หรือคาร์บอนลงไปเพื่อปรับโครงสร้างของแก้ว ยกตัวอย่าง เช่น การเติม Al_2O_3 และ Fe_2O_3 ช่วยเพิ่มความแข็งแรงและความทนทานต่อสารเคมี การเติม Na_2CO_3 K_2CO_3 Ca_2CO_3 และ $MgCO_3$ ^[17-22] ทำหน้าที่ลดอุณหภูมิในการหลอมตัวหรือลดความหนืดของแก้ว ทำให้น้ำแก้วมีความหนืดน้อยลง สามารถขึ้นรูปที่ลักษณะซับซ้อนได้และชะลอการตกผลึกในแก้ว เพื่อลดอัตราการแตกหัก ในบางครั้งมีการเจือสารบางชนิดเพื่อเพิ่มคุณสมบัติให้ตรงตามต้องการ ยกตัวอย่างงานวิจัยของ Lipatov, Y.V. และคณะ^[23] ได้ศึกษาการตกผลึกโดยการเจือเซอร์โคเนีย (zirconia)^[24] 0 - 7 wt% ในเส้นใยบะซอลต์ โดยการเจือเซอร์โคเนียมีผลทำให้อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงแก้ว (Glass transition temperature, T_g) เพิ่มขึ้นและความเสถียรทางความร้อน (thermal stability) อีกทั้งช่วยลดการแยกเฟสที่อุณหภูมิที่แตกต่างกันและเพิ่มความต้านทานในเส้นใย ในการทดลอง นำหินบะซอลต์บดผสมกับเซอร์โคเนียซิลิเกต (zirconium silicate, $ZrSiO_4$) และนำไปให้ความร้อนที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสต่อนาที ถึง 1000 องศาเซลเซียส และ

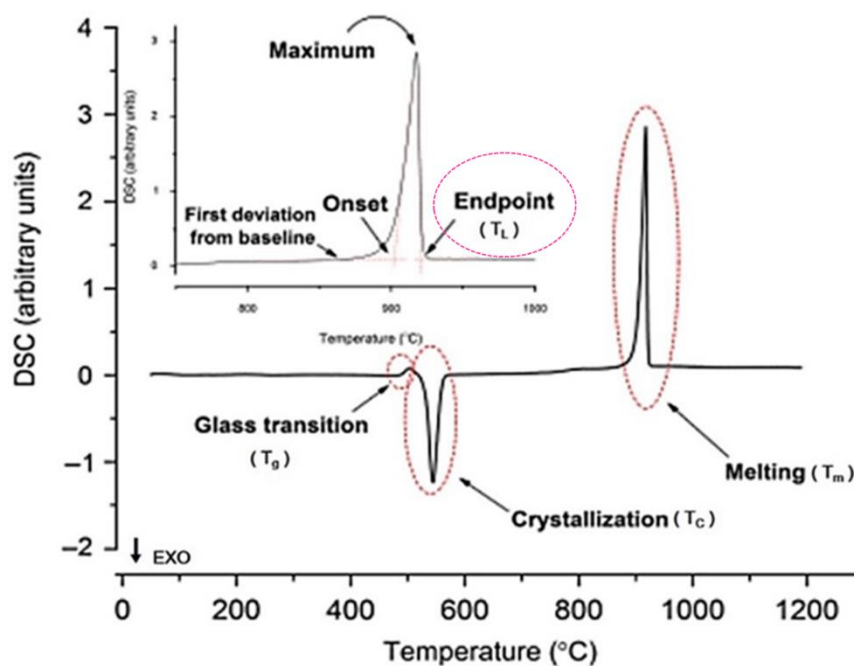
ที่ 30 องศาเซลเซียสต่อนาที ในช่วง 1000 - 1600 องศาเซลเซียส ทำให้เป็นเนื้อเดียวกัน (homogenized) เป็นเวลา 24 ชั่วโมงในอากาศ จากนั้นทำให้เย็นตัวอย่างฉับพลัน (quenching) ในน้ำและตั้งขึ้นรูปเป็นเส้นใย นำเส้นใยที่ได้มาวิเคราะห์ X-ray diffraction (XRD) เพื่อตรวจหาเฟสของผลึกที่เกิดขึ้น โดยอบ (anneal) ที่ 800 900 1000 และ 1100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่าเส้นใยที่ไม่ได้เจือเซอร์โคเนีย (0 wt%) ที่ 800 องศาเซลเซียส เกิดเฟส magnesioferrite ($MgFe_2O_4$) และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น magnesioferrite ทำหน้าที่เป็นตัวช่วยก่อให้เกิดผลึก (nucleating agent)^[25, 26] ทำให้เกิดการตกผลึกของเฟสไพรอกซีน (pyroxene) ที่ประกอบด้วย ออไจต์ (augite; $Ca(Mg,Fe,Al)(Si,Al)_2O_6$) และไดออปไซด์ ที่ 900 องศาเซลเซียส เกิดเฟสของฮีมาไทต์ (hematite; $\alpha-Fe_2O_3$) และ แพลจีโอเคลส (plagioclase) ประกอบด้วย แอลไบต์ และอะนอร์ไทต์ ในขณะที่ 800 องศาเซลเซียส เส้นใยที่เจือเซอร์โคเนีย 5 และ 7 wt% เกิดเฟส cubic complex oxide MO_x (M = Mg Zr และ Ti) และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 900 องศาเซลเซียส เส้นใยที่เจือเซอร์โคเนีย 7 wt% เกิดการตกผลึกที่สมบูรณ์ โดยมีเฟส ไพรอกซีน แพลจีโอเคลส ฮีมาไทต์ และ tetragonal ZrO_2 เกิดขึ้น ในขณะที่ 5 wt% ที่ 1000 องศาเซลเซียส เกิดการตกผลึกของ ไพรอกซีน และ tetragonal ZrO_2 อย่างสมบูรณ์ นอกจากนี้ได้วิเคราะห์อุณหภูมิในการตกผลึกด้วย Differential scanning calorimetric (DSC) ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสต่อนาที แสดงดังรูปที่ 2.5 พบว่าเส้นใยที่ไม่ได้เจือเซอร์โคเนีย (0 wt%) เกิดอุณหภูมิสภาพแก้ว (glass transition temperature, T_g) ที่ 710 องศาเซลเซียส ของแข็งเริ่มเข้าสู่ความเป็นของเหลว ทำให้เริ่มเกิดการตกผลึก เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นเกิดการแพร่ของไอออน Ca^{2+} , Mg^{2+} และ Fe^{2+} บนผิวของเส้นใย และเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของ Fe^{2+} ไปเป็น Fe^{3+} ทำให้เกิดการตกผลึกออกมาอยู่ในรูปของโครงสร้างสปินเนล (spinel)^[27, 28] ที่อุณหภูมิ 877 และ 940 องศาเซลเซียส เกิดการตกผลึกของ magnesioferrite และ ไพรอกซีน ตามลำดับ ที่อุณหภูมิมากกว่า 1000 องศาเซลเซียส เกิดการดูดพลังงานเข้าไปสลายพันธะของเฟสไพรอกซีน และเฟสอสัญฐาน (amorphous phase) ทำให้เกิดการตกผลึกของแพลจีโอเคลส ที่อุณหภูมิ 1121 องศาเซลเซียส ในขณะที่เส้นใยที่เจือเซอร์โคเนีย 5 และ 7 wt% มีค่า T_g เท่ากับ 737 และ 747 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูงกว่าเมื่อเทียบกับกับเส้นใยที่ได้เจือเซอร์โคเนีย เนื่องจากจุดหลอมเหลวของเซอร์โคเนียมีอุณหภูมิสูง ทำให้การเปลี่ยนสถานะจากแข็งเป็นของเหลวจะใช้อุณหภูมิสูง ที่ช่วงอุณหภูมิ 900 - 1000 องศาเซลเซียส เกิดการตกผลึกได้อย่างสมบูรณ์ รวมถึงการตกผลึกของเฟสฮีมาไทต์ โดยที่เส้นใยที่ไม่ได้เจือเซอร์โคเนียไม่ปรากฏเฟสฮีมาไทต์ เนื่องจากการซ้อนทับกันของผลึกและจากผลกระทบของการเกิดการดูดพลังงาน (endothermal effect)



รูปที่ 2.5 กราฟ DSC (เส้นทึบ) และ TG (เส้นประ) ของเส้นใยที่มีเซอร์โคเนียแตกต่างกัน^[23]
(T_g – glass transition temperature; T_{p1} , T_{p2} , T_{p3} – exothermal peak temperatures)

2.3 สมบัติทางความร้อน

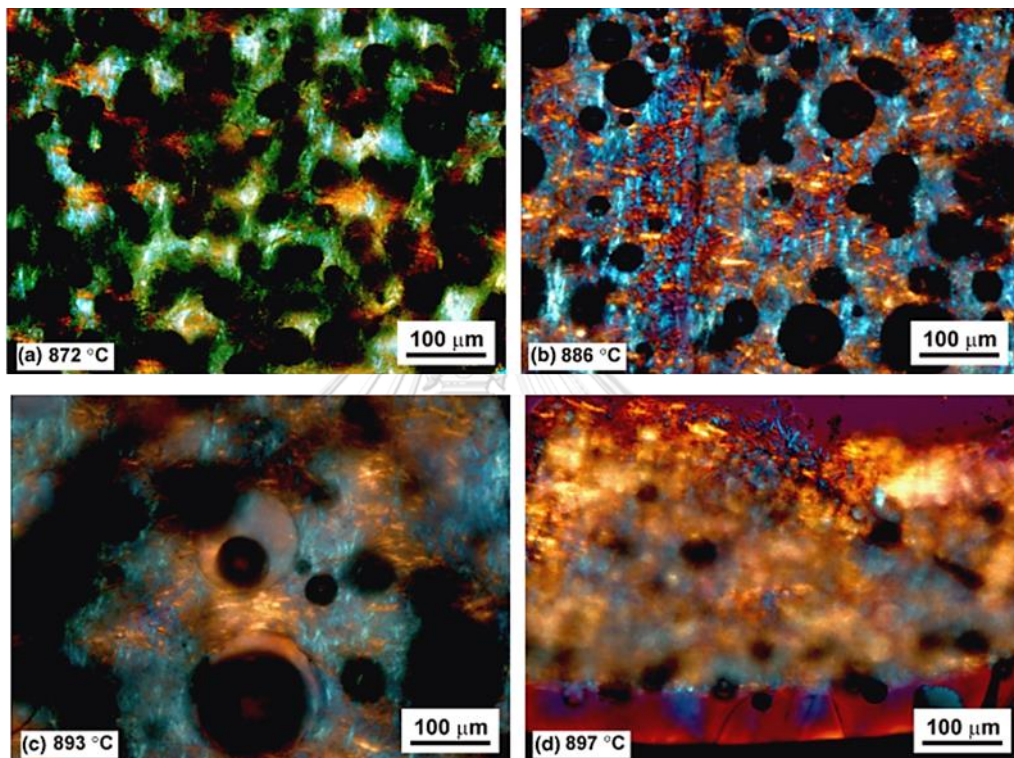
ในอุตสาหกรรมแก้ว อุณหภูมิที่ใช้ในการหลอมวัตถุดิบนั้นมีความสำคัญอย่างมาก กระบวนการหลอมแก้ว เพื่อป้องกันการตกผลึก (devitrification) หรือหลอมวัตถุดิบได้ไม่หมด ซึ่งในกระบวนการผลิตเส้นใยนั้น ไม่ควรเกิดการตกผลึกในขณะขึ้นรูป เพราะจะทำให้เกิดตำหนิเป็นสาเหตุทำให้เกิดการแตกหักและสมบัติบางอย่างเปลี่ยนไป อุณหภูมิที่สำคัญในกระบวนการหลอมแก้ว ได้แก่ อุณหภูมิสภาพแก้ว (glass transition temperature, T_g)^[29] อุณหภูมิตกผลึก (crystallization temperature, T_c)^[30, 31] อุณหภูมิการหลอมเหลว (melting temperature, T_m) และ อุณหภูมิ ลิควิดัส (liquidus temperature, T_L)^[32, 33] ดังแสดงในรูปที่ 2.6 โดยเริ่มจากการนำแก้วหรือชิ้นงานที่เตรียมได้มาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DTA/DSC จะพบว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นแก้วเกิดการดูดพลังงานความร้อน ทำให้แก้วเริ่มมีการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลว เกิดที่อุณหภูมิสภาพแก้ว (T_g) และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นแก้วเกิดการคายพลังงาน ทำให้แก้วเกิดเป็นผลึกที่อุณหภูมิตกผลึก (T_c) ซึ่งเมื่อมีการแช่ (soaking) ที่อุณหภูมินี้เป็นเวลานาน สามารถตรวจสอบเฟสของแก้วที่เกิดขึ้นได้ ต่อมาแก้วเกิดการดูดพลังงานความร้อนที่อุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) ทำให้แก้วเริ่มเกิดการหลอมเหลว และกลายเป็นน้ำแก้วโดยสมบูรณ์ที่อุณหภูมิลิควิดัส (T_L) ซึ่งเป็นจุดสิ้นสุด (endpoint) ของ T_m



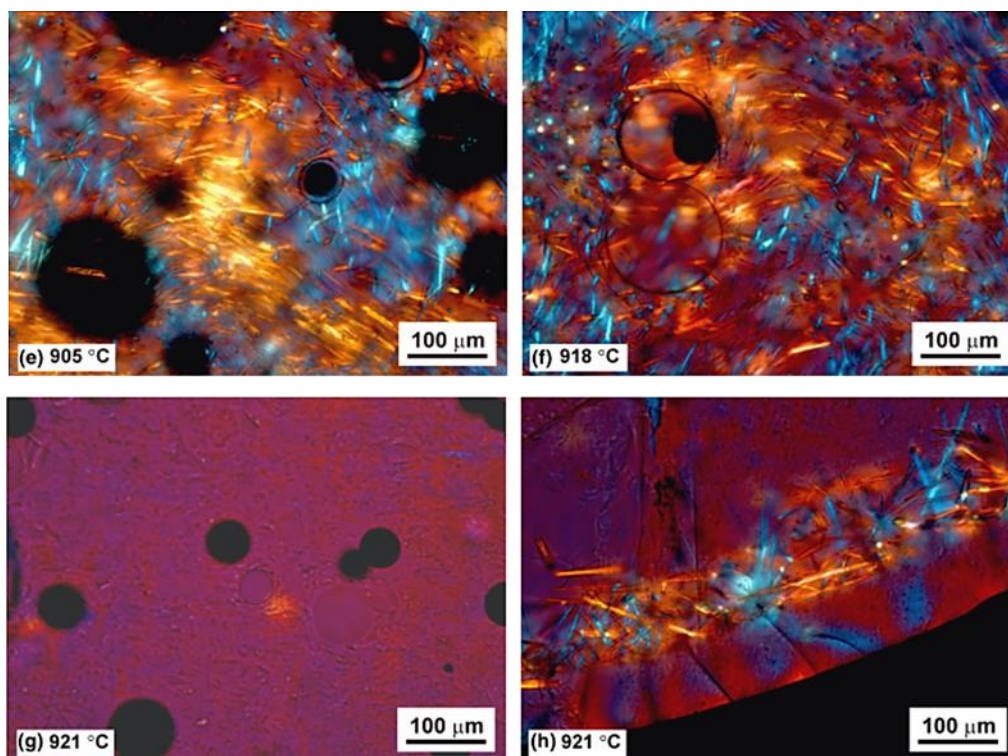
รูปที่ 2.6 กราฟแสดงจุดของ T_g , T_c , T_m และ T_L [34]

ในงานวิจัยของ Bellini, F.E. และคณะ^[34] ได้ศึกษาอุณหภูมิวิกฤต (T_L) ของแก้ว SGR ที่เตรียมโดย Saint-Gobain Recherche หนึ่งในคณะวิจัย ซึ่งทราบอุณหภูมิวิกฤตที่แน่ชัด คือ 920 องศาเซลเซียส โดยใช้เทคนิค DSC ในการกำหนดอุณหภูมิวิกฤต^[35, 36] และตรวจสอบความแม่นยำของอุณหภูมิวิกฤตที่ได้จากเครื่อง DSC ด้วยวิธี gradient furnace^[37] และวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์ เริ่มจากการนำแก้วระบบ SGR วิเคราะห์หา T_c , T_{onset} และ $T_{endpoint}$ ของ T_m ด้วยเครื่อง DSC ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียสต่อนาที พบว่า T_c , T_{onset} และ $T_{endpoint}$ เท่ากับ 860, 903 และ 921 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และจุดเบี่ยงเบนแรก (first deviation) ก่อนเข้าสู่ T_{onset} เท่ากับ 872 องศาเซลเซียส จากนั้นนำแก้ว SGR มา heat treat ที่ T_c เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้เกิดผลึก และวิเคราะห์หาอุณหภูมิวิกฤต ด้วยเครื่อง DSC ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียสต่อนาที พบว่าอุณหภูมิวิกฤต มีค่าเท่ากับ 930 องศาเซลเซียส จากนั้นตรวจสอบความแม่นยำของเครื่อง DSC ด้วยวิธี gradient furnace เริ่มจากการนำแก้ว SGR ที่ผ่านการบดละเอียด ใส่ลงไปในถ้วยอะลูมินาแล้ววางลงใน gradient furnace พร้อมกับเทอร์โมคัปเปิล (thermocouples) ให้ความร้อนในช่วง 872 - 921 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที เมื่อครบเวลาทำการปิดเตาทันทีและทิ้งให้เย็นตัวในเตา จากนั้นนำแก้ว SGR มาตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์ ผลที่ได้พบว่า ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 872 - 897 องศาเซลเซียส ในเนื้อแก้วยังคงมีผลึกเกิดขึ้นอยู่ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นที่ 905 - 918 องศาเซลเซียส แก้วเริ่มเกิดการหลอมเหลว และที่อุณหภูมิ 921 องศาเซลเซียส ผงแก้วเกิดการหลอมมากขึ้น จนกลายเป็นน้ำแก้วได้อย่างสมบูรณ์

ดังแสดงในรูปที่ 2.7 โดยสีเหลืองและสีฟ้า คือผลึกในเนื้อแก้ว, จุดสีดำ คือฟองอากาศที่เกิดขึ้นในช่วงซินเตอร์ (Sintering), สีม่วง คือน้ำแก้วที่หลอมอย่างสมบูรณ์ และที่อุณหภูมิ 921 องศาเซลเซียส รูป (h) แสดงถึงน้ำแก้ว และเนื้อถั่วอะลูมินา จึงประมาณค่าอุณหภูมิวิกฤตที่ได้จากวิธี gradient furnace ได้เท่ากับ 921 องศาเซลเซียส ซึ่งใกล้เคียงกับอุณหภูมิวิกฤตที่ได้จากเทคนิค DSC และอุณหภูมิวิกฤตที่จริงของแก้ว SGR



รูปที่ 2.7 แก้ว SGR ที่ผ่านการให้ความร้อนใน Gradient furnace ในช่วงอุณหภูมิ 872 - 921 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง^[34]

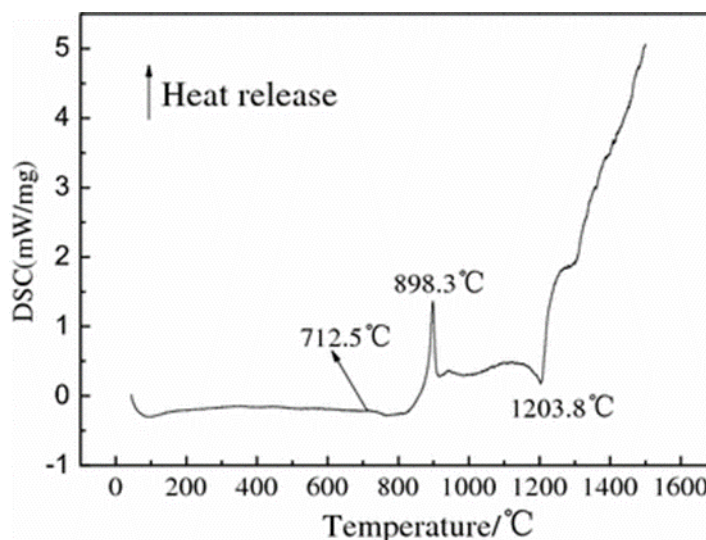


รูปที่ 2.7 (ต่อ) แก้ว SGR ที่ผ่านการให้ความร้อนใน Gradient furnace ในช่วงอุณหภูมิ 872 – 921 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง^[34]

Veit, U. และคณะ^[38] ได้ศึกษาอุณหภูมิวิกฤต (T_U) ของแก้วระบบ $\text{CaO-SiO}_2\text{-MgO-Al}_2\text{O}_3$ (CMAS) จำนวน 18 องค์ประกอบ ซึ่งใช้วิธี gradient furnace และเทคนิค DTA ในการกำหนดอุณหภูมิวิกฤต โดยวิธี gradient furnace เป็นการหาอุณหภูมิวิกฤตโดยนำแก้วแต่ละสูตรที่ผ่านการบด ใส่ลงไปใน platinum boat แล้ววางลงใน orton tubular furnace พร้อมกับเทอร์โมคัปเปิล ให้ความร้อน 1500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วดูการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค DTA โดยให้ความร้อนระหว่าง 1000 - 1300 องศาเซลเซียส ที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 2 องศาเซลเซียสต่ออนาที จากผลการทดลองพบว่า อุณหภูมิวิกฤตของวิธี gradient furnace อยู่ในช่วง 1202 - 1252 องศาเซลเซียส มีค่าความคลาดเคลื่อน ± 7 องศาเซลเซียส และจุดยุติ (endpoint) ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย tangent method ของเทคนิค DTA อยู่ในช่วง 1218 - 1237 องศาเซลเซียส มีค่าความคลาดเคลื่อน ± 3 องศาเซลเซียส เมื่อเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิที่ได้จากทั้งสองเทคนิค พบว่ามีค่าแตกต่างกันน้อยกว่า ± 10 องศาเซลเซียส ดังนั้นเทคนิค DTA จึงถูกนำมาใช้ในการพิจารณาอุณหภูมิวิกฤต เนื่องจากเหมาะสำหรับกลุ่มตัวอย่างขนาดเล็กและสามารถควบคุมอุณหภูมิได้

นอกจากนี้ในงานวิจัยของ Tian, T.L. และคณะ^[39] ได้ศึกษาพฤติกรรมของการเกิดผลึกของเส้นใยขนสัตว์ โดยวิเคราะห์หาอุณหภูมิสภาพแก้ว (T_g) และอุณหภูมิตกผลึก (T_c) ด้วยเทคนิค DTA พบว่า

ค่าอุณหภูมิ T_g , T_c และ T_m ที่ได้เท่ากับ 712.5, 898.3 และ 1203.8 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.8 โดยผลึกจะเกิดในช่วง 854 – 919 องศาเซลเซียส



รูปที่ 2.8 กราฟ DCS แสดงค่าอุณหภูมิ T_g , T_c และ T_m ของเส้นใย^[39]

2.4 คำนวณอุณหภูมิลิควิดัส

การคำนวณหาอุณหภูมิลิควิดัสจากองค์ประกอบทางเคมีของสูตรแก้ว และค่าสัมประสิทธิ์ขององค์ประกอบตามสมการ multiple regression model (สมการ 2.1)^[40, 41] เป็นวิธีการอย่างหนึ่งที่ใช้ในการวางแผนออกแบบกระบวนการหลอมแก้ว จากนั้นนำมาพล็อตกราฟเปรียบเทียบกับอุณหภูมิลิควิดัสที่ได้จากการวัดจริงในแต่ละวิธีการ แล้วพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (coefficient of determination, R^2) โดยค่า R^2 ที่ยอมรับได้นั้นควรมีค่าเข้าใกล้ 1^[42] เป็นการพิจารณาว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้ให้ผลการคำนวณอุณหภูมิลิควิดัสที่น่าเชื่อถือได้ นอกจากอุตสาหกรรมแก้วแล้วยังอุตสาหกรรมโลหะก็นำวิธีการคำนวณหาอุณหภูมิลิควิดัสไปใช้ในการหาการวางแผนงานเช่นเดียวกัน

สมการ multiple regression model

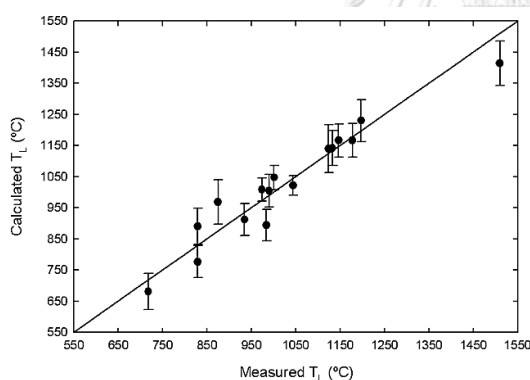
$$T_L = \sum_{i=1}^n b_i g_i$$

สมการ 2.1

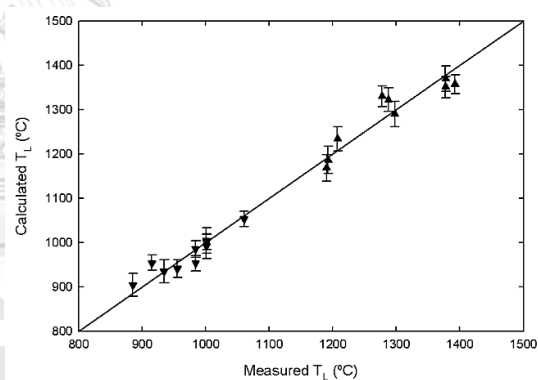
- โดย b_i คือ ค่าสัมประสิทธิ์ขององค์ประกอบ i
 g_i คือ เศษส่วนโมล (mass fraction) ขององค์ประกอบ i
 n คือ จำนวนองค์ประกอบในโมเดล
 T_L คือ อุณหภูมิลิควิดัส

ในงานวิจัยของ Rao, Q. และคณะ^[42] ได้ศึกษาอุณหภูมิลิควิดัสของแก้วที่ได้จากการหลอม High-Level Waste, HLW ที่มีเซอร์โคเนียมเป็นองค์ประกอบ โดยเปรียบเทียบอุณหภูมิลิควิดัสของแก้วจากวิธีการ composition variation study (CVS) และ transuranic (TRU) ที่ได้จากการวัดด้วยเทคนิคต่าง ๆ และการคำนวณจาก first-order multiple regression model (สมการ 2.1) ซึ่งแก้ว CVS ประกอบด้วย Al_2O_3 , B_2O_3 , CaO , Fe_2O_3 , Li_2O , MgO , Na_2O , SiO_2 , ZrO_2 และอื่น ๆ (Bi_2O_3 , CeO_2 และ P_2O_5) จำนวน 19 องค์ประกอบ อุณหภูมิลิควิดัสของแก้ว CVS วัดด้วยเทคนิค gradient temperature furnace (GTF) สำหรับอุณหภูมิลิควิดัสไม่เกิน 1100 องศาเซลเซียส และวัดด้วยเทคนิค uniform temperature furnace (UTF) สำหรับอุณหภูมิลิควิดัสตั้งแต่ 1100 องศาเซลเซียสขึ้นไป และแก้ว TRU ประกอบด้วย Al_2O_3 , B_2O_3 , Bi_2O_3 , CeO_2 , Li_2O , Na_2O , P_2O_5 , SiO_2 และ ZrO_2 จำนวน 31 องค์ประกอบ อุณหภูมิลิควิดัสของแก้วระบบ TRU วัดด้วยเทคนิค UTF พบว่าอุณหภูมิลิควิดัสแก้ว CVS อยู่ในช่วง 862 - 1187 องศาเซลเซียส และแก้วระบบ TRU อยู่ในช่วง 930 - 1350 องศาเซลเซียส และนำแก้วทั้ง 2 วิธีมาวิเคราะห์ XRD เพื่อหาเฟสของผลึกที่เกิดขึ้น พบว่าแก้วทั้ง 2 วิธีเกิดเฟส $ZrSiO_4$ (zircon) และ ZrO_2 (baddeleyite) เมื่อทำการเปรียบเทียบอุณหภูมิลิควิดัสที่ได้จากการวัดและจากการคำนวณ พบว่าแก้ว CVS ที่เฟส zircon อุณหภูมิต่างกัน 31 องศาเซลเซียส และที่เฟส zirconium (zircon + baddeleyite) ไม่สามารถเปรียบเทียบได้เนื่องจากมีการกระจายตัวของอุณหภูมิสูง ในขณะที่แก้ว TRU ที่เฟส zircon อุณหภูมิต่างกัน 17 องศาเซลเซียส และที่เฟส เซอร์โคเนียม อุณหภูมิต่างกัน 37 องศาเซลเซียส เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิลิควิดัสเมื่อเกิดการเปลี่ยนเฟสจาก zircon ที่อุณหภูมิต่ำไปยังเฟสแบดเดเลย์ไอด์ อุณหภูมิสูงไม่มีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น ดังนั้นองค์ประกอบทางเคมี และเฟสที่เกิดขึ้นจึงมีผลต่อการคำนวณอุณหภูมิลิควิดัสจากแบบจำลอง

นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยของ Hanni, J.B. และคณะ^[43] ได้ศึกษาการวัดอุณหภูมิลิควิดส์ของกากของเสียนิวเคลียร์ (nuclear waste) ของแก้วระบบหลักคือ Al_2O_3 B_2O_3 Na_2O CaO และ SiO_2 จำนวน 50 องค์ประกอบ โดยอุณหภูมิลิควิดส์ได้จากการวัดด้วยเทคนิค gradient temperature furnace ที่อุณหภูมิสูงสุด 1600 องศาเซลเซียส และจากการคำนวณตามสมการ 2.1 ในการคำนวณนั้นจะแบ่งการคำนวณออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ตามเฟสหลักที่เกิดขึ้น ได้แก่ กลุ่มของเฟสเนเฟลิน (nepheline) จำนวน 17 องค์ประกอบ และกลุ่มของเฟสโวลลาสโทไนต์ (wollastonite) จำนวน 19 องค์ประกอบ ซึ่งแก้วในบางองค์ประกอบนั้นไม่สามารถตรวจวัดค่าอุณหภูมิลิควิดส์และเฟสได้เนื่องจากหลอมไม่หมดที่อุณหภูมิสูง หรือเกิดการตกผลึกซ้ำ จากนั้นนำเศษส่วนขององค์ประกอบแต่กลุ่มเฟส (b_i) มาคำนวณเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ขององค์ประกอบ (g_i) เพื่อนำมาใช้ในการคำนวณหาอุณหภูมิลิควิดส์ และนำค่าอุณหภูมิลิควิดส์ที่ได้จากการคำนวณ และเทคนิค gradient temperature furnace มาพล็อตกราฟ ดังรูปที่ 2.9 พบว่าค่า R^2 ของกลุ่มของเฟสเนเฟลิน และโวลลาสโทไนต์ มีค่าเท่ากับ 0.924 และ 0.981 ตามลำดับ ดังนั้นสามารถนำค่าสัมประสิทธิ์ขององค์ประกอบ (g_i) ของทั้งสองกลุ่มเฟสมาใช้ในการคำนวณหาอุณหภูมิลิควิดส์ในระบบแก้วชนิดนี้ได้



กลุ่มของเฟสเนเฟลิน



กลุ่มของเฟสโวลลาสโทไนต์

รูปที่ 2.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิลิควิดส์ที่ได้จากการคำนวณ และเทคนิค gradient temperature furnace ของกลุ่มของเฟสเนเฟลิน และโวลลาสโทไนต์^[43]

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดของสารเคมี อุปกรณ์ และวิธีการที่ใช้ในการเตรียมแก้วฐานบะซอลต์ในระบบของ $\text{SiO}_2\text{-CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO-Fe}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O-K}_2\text{O}$ สำหรับการหาอุณหภูมิวิกฤต รวมถึงวิธีการวิเคราะห์เชิงความร้อน ตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมี โครงสร้างทางจุลภาค ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

3.1 สารเคมีวัตถุดิบและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 สารเคมีและวัตถุดิบ

- หินบะซอลต์ จากหลุมเจาะในเขตสัมปทานของ บริษัท ไมน์เค็ม จำกัด อ.ชัยบาดาล จ.ลพบุรี ประเทศไทย
- แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ความบริสุทธิ์ 99% ผลิตโดยบริษัท Ajax Finechem ประเทศออสเตรเลีย
- อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ความบริสุทธิ์ 95% ผลิตโดยบริษัท Ajax Finechem ประเทศออสเตรเลีย
- แมกนีเซียมคาร์บอเนต (MgCO_3) ความบริสุทธิ์ 40-45% MgO ผลิตโดยบริษัท HiMedia Laboratories ประเทศอินเดีย
- ไอรอนออกไซด์ (Fe_2O_3) ความบริสุทธิ์ 95% ผลิตโดยบริษัท Fluka ประเทศสวิตเซอร์แลนด์
- โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) ความบริสุทธิ์ 99% ผลิตโดยบริษัท Ajax Finechem ประเทศออสเตรเลีย
- โพแทสเซียมคาร์บอเนต (K_2CO_3) ความบริสุทธิ์ 99% ผลิตโดยบริษัท Ajax Finechem ประเทศออสเตรเลีย
- โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) ผลิตโดยบริษัท Fluka ประเทศสวิตเซอร์แลนด์
- เอทานอล (Ethanol) ความบริสุทธิ์ 99.99% ผลิตโดยบริษัท Merck ประเทศเยอรมัน
- กรดไฮโดรฟลูออริก (HF)

3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- ช้อนตักสารเคมี (Spatula)
- ปีกเกอร์ขนาด 100 และ 500 มิลลิลิตร
- เ้าอะลูมินาสำหรับหลอมแก้ว (alumina crucible)
- ที่คีบครุซีเบิล (crucible tong)
- ถังน้ำสแตนเลส
- ชั้นน้ำสแตนเลส
- โกร่งบดสาร (mortar and pestle)
- ตะแกรงร่อน (sieve) ขนาด 100 Mesh
- ถ้วยแพลทินัม (platinum pan)
- แผ่นแพลทินัม (platinum plate)
- ที่คีบชิ้นงาน (forceps)
- กระจาดขังสาร
- แม่พิมพ์โลหะสำหรับอัดชิ้นรูป ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 13 มิลลิเมตร
- ถาดอะลูมินาเซรามิก (alumina boat)

3.1.3 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

- เตาหลอมแก้ว
- เตา bottom loading
- เครื่องอัดระบบไฮดรอลิก (hydraulic press)
- เครื่องบด vibratory disc mill
- เครื่องชั่งดิจิตอลความละเอียด 0.01 กรัม
- เครื่องชั่งดิจิตอลความละเอียด 0.0001 กรัม
- ตู้อบสารอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส
- กล้องจุลทรรศน์ (optical microscope)
- เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffractometer, XRD)
- เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี (X-Ray Fluorescence, XRF)
- เครื่องมือวิเคราะห์ความแตกต่างทางความร้อน (Simultaneous Thermal Analysis, STA)

3.2 ขั้นตอนการวิจัย

3.2.1 การเตรียมแก้วฐานบะซอลต์

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมส่วนผสมประกอบของแก้วฐานบะซอลต์ในระบบของ SiO_2 -CaO- Al_2O_3 -MgO- Fe_2O_3 - Na_2O - K_2O จากหินบะซอลต์ที่ผ่านการบดลดขนาดด้วยเครื่องบด vibratory disc mill ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 100 เมช และสารประกอบออกไซด์และคาร์บอเนต ได้แก่ CaCO_3 , Al_2O_3 , MgCO_3 , Fe_2O_3 , Na_2CO_3 และ K_2CO_3 ตามปริมาณที่แสดงในตารางที่ 3.1 ที่ได้จากการออกแบบการทดลองด้วยโปรแกรม Minitab[®] 17.1.0 โดยใช้วิธีการออกแบบส่วนผสม แบบ Extreme Vertices Design และสุ่มผลการออกแบบมาจำนวน 30 ตัวอย่าง (ภาคผนวก ข) จากนั้นนำสารประกอบออกไซด์แต่ละสูตรที่ผสมแล้วใส่ในเบ้าอะลูมินา ในเตาหลอมแก้ว ที่อุณหภูมิ 1450 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ทิ้งไว้ที่อุณหภูมินี้เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นทำให้เย็นตัวอย่างฉับพลันในน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 3.1 นำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส และบดให้ละเอียด ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 100 เมช

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบทางเคมีของแก้วฐานบะซอลต์จากการออกแบบการทดลอง

สูตร	ปริมาณ (ร้อยละน้ำหนัก)						
	SiO_2	CaO	Al_2O_3	MgO	Fe_2O_3	Na_2O	K_2O
BG 1	51.12	13.33	18.33	8.33	6.83	1.03	1.03
BG 2	57.00	15.00	20.00	3.00	5.00	0.00	0.00
BG 3	45.00	5.00	20.00	10.00	12.00	4.00	4.00
BG 4	57.00	5.00	13.00	10.00	7.00	4.00	4.00
BG 5	48.00	16.00	13.00	3.00	12.00	4.00	4.00
BG 6	45.00	16.00	20.00	10.00	5.00	0.00	4.00
BG 7	57.00	5.00	20.00	3.00	12.00	0.00	3.00
BG 8	52.00	16.00	13.00	10.00	5.00	4.00	0.00
BG 9	57.00	8.00	20.00	10.00	5.00	0.00	0.00
BG 10	57.00	14.00	13.00	3.00	5.00	4.00	4.00
BG 11	45.00	16.00	20.00	3.00	12.00	0.00	4.00
BG 12	48.00	16.00	20.00	3.00	5.00	4.00	4.00
BG 13	53.00	5.00	20.00	10.00	12.00	0.00	0.00
BG 14	57.00	7.00	20.00	3.00	5.00	4.00	4.00
BG 15	57.00	7.00	13.00	3.00	12.00	4.00	4.00

ตารางที่ 3.1 (ต่อ) องค์ประกอบทางเคมีของแก้วฐานบะซอลต์จากการออกแบบการทดลอง

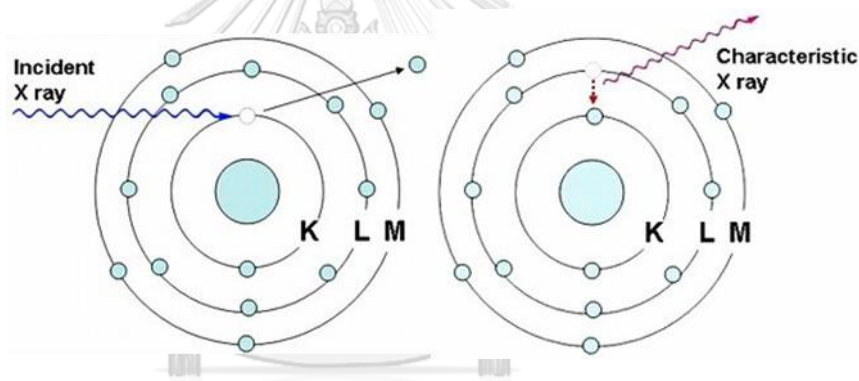
สูตร	ปริมาณ (ร้อยละน้ำหนัก)						
	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O
BG 16	45.00	16.00	13.00	10.00	8.00	4.00	4.00
BG 17	57.00	11.00	13.00	10.00	5.00	0.00	4.00
BG 18	57.00	16.00	13.00	9.00	5.00	0.00	0.00
BG 19	52.00	5.00	20.00	3.00	12.00	4.00	4.00
BG 20	57.00	11.50	13.00	6.50	12.00	0.00	0.00
BG 21	50.50	10.50	20.00	3.00	12.00	4.00	0.00
BG 22	47.00	16.00	15.00	10.00	12.00	0.00	0.00
BG 23	48.50	8.50	13.00	10.00	12.00	4.00	4.00
BG 24	48.50	8.50	20.00	10.00	5.00	4.00	4.00
BG 25	52.50	16.00	16.50	3.00	12.00	0.00	0.00
BG 26	45.00	12.50	20.00	10.00	8.50	4.00	0.00
BG 27	57.00	5.00	14.50	10.00	12.00	0.00	1.50
BG 28	52.50	11.50	13.00	3.00	12.00	4.00	4.00
BG 29	52.50	11.50	20.00	3.00	5.00	4.00	4.00
BG 30	57.00	16.00	13.00	3.00	9.00	0.00	2.00



รูปที่ 3.1 แก้วฟริตที่เตรียมได้

3.2.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี (X-Ray Fluorescence, XRF)

ในงานวิจัยนี้ได้มีการวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีของแก้วฐานบะซอลต์ในแต่ละสูตรด้วยเทคนิคการเรืองแสงของรังสีเอกซ์ โดยอาศัยหลักการที่เมื่อยังรังสีเอกซ์ที่มีพลังงานสูงเข้าไปในตัวอย่าง ซึ่งอิเล็กตรอนในวงโคจรของอะตอมแบ่งเป็นชั้น (shells) โดยชั้นในสุด ได้แก่ ชั้น K มีระดับพลังงาน (energy level) ต่ำสุด ถัดออกมา ได้แก่ ชั้น L, M, ... ซึ่งจะมีระดับพลังงานสูงขึ้นตามลำดับ เมื่อยังรังสีเอกซ์ชนกับอิเล็กตรอนในวงโคจรทำให้อิเล็กตรอนในชั้นระดับพลังงานต่ำสุดหลุดออกไปส่งผลให้ตำแหน่งนั้นว่าง อิเล็กตรอนในชั้นที่มีพลังงานสูงกว่าจะเข้ามาแทนที่ ดังรูปที่ 3.2 เกิดการคายพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปโฟตอน (photon) เรียกกระบวนการนี้ว่า การเรืองรังสีเอกซ์ (fluorescence) ซึ่งโฟตอนที่ปล่อยออกมาของแต่ละธาตุนั้นจะมีค่าพลังงานเฉพาะตัว (characteristic X-ray) จึงทำให้สามารถบอกถึงองค์ประกอบทางเคมีของธาตุแต่ละชนิดที่มีอยู่ในตัวอย่างได้ ทั้งนี้ปริมาณโฟตอนที่ปล่อยออกมาขึ้นอยู่กับปริมาณของธาตุนั้น ๆ ในสารตัวอย่างด้วยเช่นกัน



รูปที่ 3.2 อิเล็กตรอนในชั้น K หลุด และอิเล็กตรอนในชั้น M ที่มีพลังงานสูงกว่าลงมาแทนที่

ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานนั้น เริ่มจากการนำผงแก้วแต่ละสูตรอัดลงในเป่าอะลูมิเนียม จากนั้นนำไปวางที่บริเวณช่องสำหรับสำหรับให้รังสีเอกซ์ในเครื่อง XRF ยี่ห้อ Rigaku รุ่น ZSX Primus III+ เครื่องจะทำการรายงานผลในลักษณะของค่าความเข้มของรังสีเอกซ์ที่ได้รับจากอะตอมของธาตุแล้วคำนวณออกมาเป็นร้อยละของปริมาณออกไซด์

3.2.3 การวิเคราะห์อุณหภูมิสภาพแก้ว (T_g), อุณหภูมิตกผลึก (T_c) และจุดยุติของอุณหภูมิหลอมเหลว ($T_{Endpoint}$)

ในงานวิจัยได้มีการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนด้วยเครื่อง Simultaneous Thermal Analysis, STA ยี่ห้อ Linseis รุ่น PT1600 โดยใช้หลักการการเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของสารตัวอย่าง และสารอ้างอิง ที่อยู่ในสภาพแวดล้อมเดียวกัน ในขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ตัวอย่างและสารอ้างอิงควรอยู่ในสภาพแวดล้อมเดียวกัน และได้รับความร้อนเท่ากัน ซึ่งเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของสารด้วยอัตราความร้อนที่แน่นอน แล้วตรวจสอบความแตกต่างของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงของสารตัวอย่างเทียบกับสารอ้างอิง ถ้าอุณหภูมิของสารตัวอย่างต่ำกว่าสารอ้างอิงแสดงว่า เกิดการเปลี่ยนแปลงแบบดูดความร้อน (endothermic) แต่ถ้าอุณหภูมิของสารตัวอย่างสูงกว่าสารอ้างอิงแสดงว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงแบบคายความร้อน (exothermic) ซึ่งเป็นผลของการเปลี่ยนเฟสหรือ การเกิดปฏิกิริยาทางเคมีในสารตัวอย่างโดยที่สารอ้างอิงจะไม่มีปฏิกิริยาใด ๆ เกิดขึ้น สำหรับการวิเคราะห์นั้น นำผงแก้วบรรจุลงในถ้วยแพลทินัม แล้ววางลงในช่องใส่ตัวอย่างในตำแหน่งเตาในเครื่อง STA โดยใช้ถ้วยแพลทินัมเปล่าเป็นสารอ้างอิง ให้ความร้อนในช่วงอุณหภูมิห้องถึง 1400 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ผลที่ได้จะแสดงอยู่ในรูปของกราฟ

3.2.4 การวัดอุณหภูมิลิควิดัส (T_L)

การวัดอุณหภูมิลิควิดัสในงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 2 วิธี คือ วัดด้วยเทคนิค Differential Thermal Analysis, DTA และวิธีวิเคราะห์ทางความร้อนที่อุณหภูมิคงที่ (Isothermal) ในเตา bottom loading ซึ่งงานที่ใช้ในการวัดอุณหภูมิลิควิดัส เตรียมโดยการนำผงแก้วที่บดแล้วใส่ลงในแม่พิมพ์ทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 13 มิลลิเมตร แล้วอัดขึ้นรูปให้มีลักษณะทรงกระบอกหนา 2 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ด้วยเครื่องอัดแบบทิศทางเดียว (uniaxial hydraulic press) จากนั้นนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DTA และวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิคงที่ จากนั้นนำค่าอุณหภูมิลิควิดัสที่ได้จากการวัดจริงในแต่ละวิธีการมาพล็อตกราฟเปรียบเทียบ



รูปที่ 3.3 ผงแก้วที่ผ่านการอัดขึ้นรูปเป็นเม็ด

- การวัดอุณหภูมิวิกฤตด้วยเทคนิค DTA

สำหรับการวัดอุณหภูมิวิกฤตด้วย DTA แบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ ขั้นแรกนำผงแก้วที่ผ่านอัดขึ้นรูปเป็นเม็ดวางลงบนถาดอะลูมินา จากนั้นทำการอบแก้ว (heat treatment) ในเตา bottom loading ดังแสดงในรูปที่ 3.4 ที่ T_c ของแก้วฐานบะซอลต์แต่ละสูตรที่ได้จากการวิเคราะห์ขั้นต้นเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที เพื่อเปลี่ยนสถานะจากแก้วเป็นกลาสเซรามิก ขั้นตอนถัดไป คือการนำกลาสเซรามิกที่ได้บดให้ละเอียด และร่อนผ่านตะแกรงขนาด 100 เมช จากนั้นทำการวิเคราะห์ โดยบรรจุผงกลาสเซรามิกลงในถ้วยแพลทินัม แล้วนำไปวางในตำแหน่งสำหรับวางตัวอย่างของเครื่อง DTA โดยใช้ถ้วยแพลทินัมเปล่าเป็นสารอ้างอิง ให้ความร้อนในช่วงอุณหภูมิห้องถึง 1400 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที และรายงานผลออกมาในรูปกราฟ โดยวิเคราะห์จุดอุณหภูมิวิกฤตด้วยวิธี tangent method ณ จุดยุติของปฏิกิริยาการดูดความร้อน (T_{Endpoint}) เมื่อผลึกหลอมหมด



รูปที่ 3.4 เตา Bottom loading

- วัดด้วยกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิคงที่ (Isothermal process)

สำหรับการวัดอุณหภูมิควิตต์ด้วยวิธี Isothermal เริ่มจากการนำเม็ดผงแก้วที่ได้จากการอัดขึ้นรูปมาตัดแบ่งให้มีขนาดเล็กลง วางลงบนแผ่นแพลทินัมในภาตอะลูมินา ดังแสดงในรูปที่ 3.5 จากนั้นให้ความร้อนที่ T_{Endpoint} ดังรูปที่ 2.6 ที่ได้จากการวิเคราะห์ขั้นต้น เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที ในเตา bottom loading จากนั้นทำให้เย็นตัวอย่างฉับพลันในอากาศ แล้วนำไปตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์ (optical Microscope) เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของกลาสเซรามิก พร้อมทั้งจดบันทึกอุณหภูมิที่กลาสเซรามิกหลอมเป็นน้ำแก้วได้อย่างสมบูรณ์ ปราศจากผลึก



รูปที่ 3.5 ชิ้นงานสำหรับการวัดอุณหภูมิควิตต์ด้วยวิธี Isothermal

3.2.5 การตรวจสอบหาโครงสร้างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffractometer, XRD)

เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เป็นเทคนิคหนึ่งที่ใช้ในการการศึกษาวิเคราะห์โครงสร้างผลึกโดยที่ไม่ทำลายตัวอย่าง โดยอาศัยหลักการการตกกระทบของรังสีเอกซ์ลงบนพื้นผิวของวัตถุแล้วเกิดการกระเจิงแสงและการเลี้ยวเบน โดยมุมการเลี้ยวเบนจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับโครงสร้างผลึกและระนาบ (hkl) ของรังสีเอกซ์ของรังสีที่กระทบภายในวัตถุ ซึ่งรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์แต่ละชนิดจะมีความจำเพาะเจาะจง ดังนั้นเมื่อนำเครื่องมือตรวจวัด (detector) มารองรับรังสีเอกซ์ที่กระเจิงออกมาจากวัตถุในตำแหน่งต่าง ๆ ก็สามารถทำการตรวจสอบได้ว่าวัตถุนั้นเป็นสารประเภทใด โดยพิจารณาจากความสัมพันธ์ค่ามุมของแบรกก์ (Bragg's angle) และความเข้มของรังสีเอกซ์ของรูปแบบการเลี้ยวเบนที่ปรากฏ ซึ่งสารแต่ละชนิดจะมีรูปแบบการเลี้ยวเบนที่มีลักษณะเฉพาะที่แตกต่างกันจึงสามารถนำรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ตรวจสอบได้เปรียบเทียบกับข้อมูลชนิดต่าง ๆ ที่มีฐานข้อมูลมาตรฐาน (Joint Committee on Powder Diffraction Standard, JCPDS file) เพื่อตรวจสอบชนิดของเฟสที่เกิดขึ้น โดยตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์นั้น เตรียมจากการนำผงหรือเม็ด

ชิ้นงานที่ผ่านการ heat treatment ที่อุณหภูมิตกผลึกวางบน holder จากนั้นวางที่บริเวณช่องสำหรับวิเคราะห์ในเครื่อง XRD ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advanced ใช้เป้าทองแดงที่ให้รังสีเอกซ์ค่าความยาวคลื่นประมาณ 1.54 Å scanning speed 0.02 องศาต่อนาที จากค่ามุม 2θ ที่ 10 - 80 องศา

3.2.6 คำนวณหาอุณหภูมิควิตัส

ในงานวิจัยนี้ได้นำสมการ multiple regression model (สมการ 2.1) มาใช้ในการคำนวณอุณหภูมิควิตัส (T_L) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ (multiple Linear Regression)^[44, 45] คือ การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ตัวแปรตาม (dependent variable) และตัวแปรอิสระ (independent variable) ที่มีมากกว่าหนึ่งค่า ซึ่งมีความสัมพันธ์แบบเส้นตรง เขียนให้อยู่ในรูปของสมการได้ดังนี้

$$T_L = \sum_{i=1}^n b_i g_i = b_0 + b_1 g_1 + b_2 g_2 + \dots + b_n g_n \quad \text{สมการ 3.1}$$

โดย b_i คือ ค่าสัมประสิทธิ์ขององค์ประกอบ i
 g_i คือ เศษส่วนโมล (mass fraction) ขององค์ประกอบ i
 n คือ จำนวนองค์ประกอบในโมเดล
 T_L คือ อุณหภูมิควิตัส

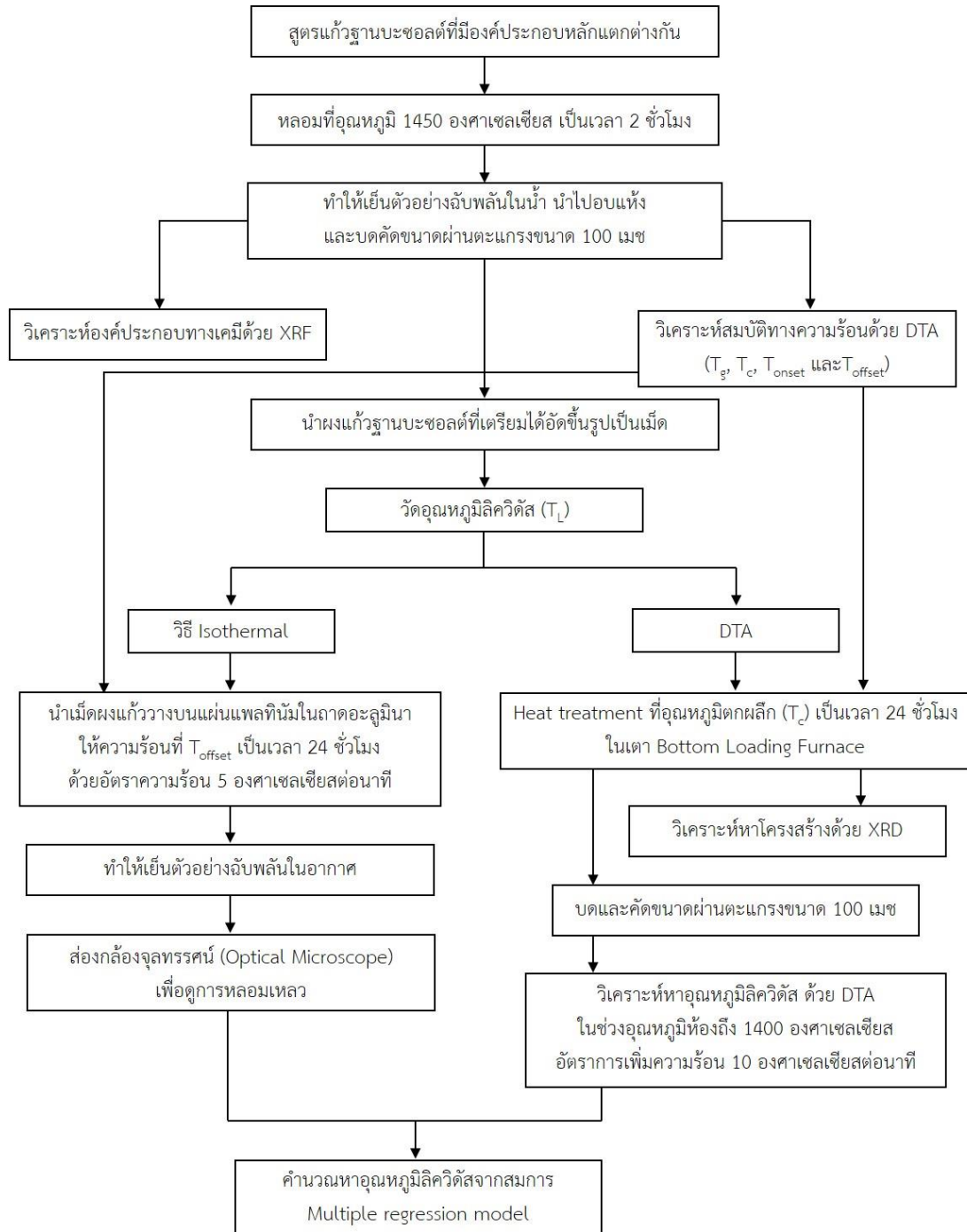
โดยใช้ค่าอุณหภูมิควิตัส ที่ได้จากการทดลองแทนค่าในตัวแปร T_L ซึ่งค่าที่คำนวณได้คือ ค่าสัมประสิทธิ์ขององค์ประกอบ i (b_i) เขียนให้อยู่ในรูปของสมการ Matrix ได้ดังนี้

$$[T_L] = [b_i][g_i]$$

$$\therefore [b_i] = [T_L][g_i]^{-1} \quad \text{สมการ 3.2}$$

จากนั้นนำค่าอุณหภูมิควิตัสที่ได้จากการวัดจริงในแต่ละวิธีการมาพล็อตกราฟเปรียบเทียบกับผลการคำนวณหาอุณหภูมิควิตัสจากแบบจำลองที่ได้ แล้วพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination, R^2) ที่ยอมรับได้นั้นควรมีค่าเข้าใกล้ 1

3.3 แผนผังการทดลอง



รูปที่ 3.6 แผนผังการทดลอง

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

บทนี้จะนำเสนอเกี่ยวกับผลการทดลองของการหาอุณหภูมิวิกฤตของแก้วฐานบะซอลต์ สำหรับการขึ้นรูปเส้นใย พร้อมผลการตรวจสอบการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี สมบัติทางความร้อน องค์ประกอบทางเฟส และคำนวณอุณหภูมิวิกฤต ดังต่อไปนี้

4.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของแก้ว

ในการเตรียมแก้วของระบบ $\text{SiO}_2\text{-CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO-Fe}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O-K}_2\text{O}$ จากหินบะซอลต์ และสารประกอบออกไซด์และคาร์บอเนต ได้แก่ CaCO_3 , Al_2O_3 , MgCO_3 , Fe_2O_3 , Na_2CO_3 และ K_2CO_3 นำไปให้ความร้อนและทำให้เย็นตัวอย่างฉับพลันในน้ำในลักษณะแก้วพริต บดละเอียดร่อนผ่านตะแกรงขนาด 100 เมช เพื่อทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่องวิเคราะห์หาปริมาณธาตุองค์ประกอบ (XRF) ได้ผลการทดลองดังนี้

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของแก้วฐานบะซอลต์จาก XRF

องค์ประกอบทางเคมี	ปริมาณ (ร้อยละน้ำหนัก)
SiO_2	40.5 - 52.8
CaO	5.49 - 17.70
Al_2O_3	13.50 - 20.30
MgO	1.83 - 10.50
Fe_2O_3	5.43 - 10.90
Na_2O	3.36 - 5.41
K_2O	2.17 - 4.44
TiO_2	0.67 - 0.95

จากตารางที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าปริมาณของแต่ละธาตุในของสูตรแก้วนั้นอยู่ในช่วงที่สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยแก้วได้ตามตารางที่ 2.1 โดยปริมาณของซิลิกาที่ได้นั้นอยู่ในช่วงร้อยละ 40.5 - 52.8 เป็นค่าที่สามารถนำมาขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้ เนื่องจากถ้าปริมาณของซิลิกามากเกินไปจะส่งผลต่อความเหนียวของหินบะซอลต์หลอมเหลวและส่งผลถึงความยากต่อการขึ้นรูปเป็นเส้นใย

4.2 ผลการตรวจสอบองค์ประกอบทางเฟสด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

เมื่อนำผงแก้วที่ผ่านการอัดเม็ดมาผ่านกระบวนการทางความร้อน ณ อุณหภูมิใกล้กับ T_c ของแต่ละสูตรที่ได้จากการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DTA เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที แล้วนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD และเปรียบเทียบกับสารมาตรฐานในแฟ้มข้อมูล JCPDS ซึ่งได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.1 ถึง รูปที่ 4.6 พบว่าสูตรแก้วฐานบะซอลต์โดยส่วนใหญ่มีเฟสหลักคือ เฟสไดออปไทต์ และเฟสแอลไบต์ ทั้งนี้ หินบะซอลต์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นหินชนิดโทไลโอต์กึ่งแอลคาไลน์ ซึ่งประกอบด้วยสารแอลคาไลน์ ออกไซด์เป็นส่วนใหญ่ ทำให้มีเฟสลูไซต์ (leucite; $KAlSi_2O_6$) และเฟสเนฟิไลน์เกิดขึ้น โดยเฟสลูไซต์จะพบในสูตรแก้วที่มีปริมาณของโพแทสเซียมออกไซด์มาก เช่น สูตรแก้ว BG 2, BG 3 และ BG 5 และเฟสเนฟิไลน์พบในสูตรแก้วที่มีปริมาณของโซเดียมออกไซด์มาก เช่น สูตรแก้ว BG 6, BG 8 และ BG 10 และพบเฟสฮีมาไทต์ ที่สูตรแก้ว BG 7 และ BG 19 มีผลมาจากปริมาณของ Fe_2O_3 มีปริมาณที่สูงเมื่อเทียบกับสูตรแก้วอื่น ๆ รวมถึงความสัมพันธ์กับ T_c ที่เกิดที่อุณหภูมิสูง เมื่อให้ความร้อนเป็นเวลานาน จึงส่งผลให้เกิดการตกผลึกของเฟสนี้ได้

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเฟสของแต่ละสูตรแก้ว

สูตร	A	D	L	H	N	S	C
BG 1	✓	✓	-	-	-	-	-
BG 2	✓	✓	✓	-	-	-	✓
BG 3	✓	✓	✓	-	-	-	-
BG 4	✓	✓	-	-	-	-	-
BG 5	✓	✓	✓	-	-	-	✓
BG 6	-	✓	-	-	✓	-	-
BG 7	✓	-	-	✓	-	-	-
BG 8	-	✓	✓	-	✓	-	-
BG 9	✓	✓	-	-	-	-	-
BG 10	✓	✓	-	-	✓	-	-
BG 11	✓	✓	-	-	-	-	-

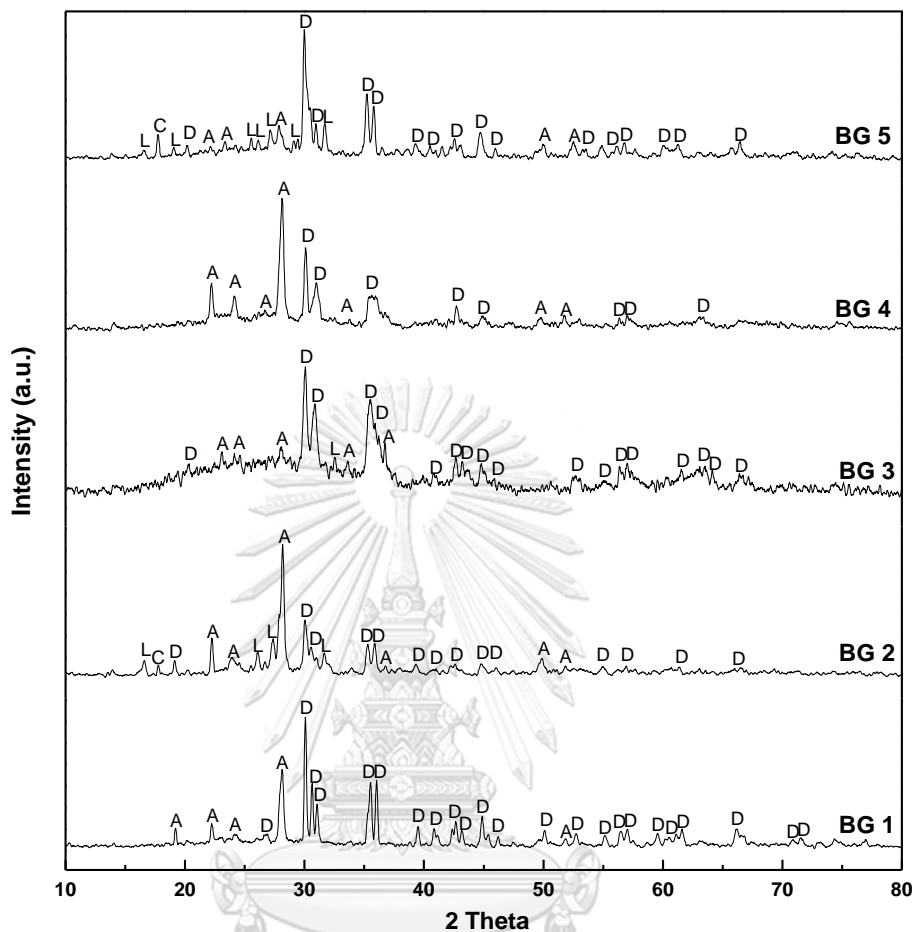
ตารางที่ 4.2 (ต่อ) องค์ประกอบทางเฟสของแต่ละสูตรแก้ว

สูตร	A	D	L	H	N	S	C
BG 12	✓	✓	✓	-	✓	✓	-
BG 13	✓	✓	✓	-	-	-	-
BG 14	✓	✓	✓	-	-	-	-
BG 15	✓	✓	✓	-	-	-	-
BG 16	-	✓	-	-	✓	✓	-
BG 17	✓	✓	-	-	-	-	-
BG 18	-	✓	-	-	✓	-	-
BG 19	✓	✓	-	✓	-	-	-
BG 20	✓	✓	-	-	-	-	-
BG 21	✓	✓	-	-	-	-	-
BG 22	-	✓	-	-	✓	-	-
BG 23	✓	✓	-	-	-	-	-
BG 24	✓	✓	-	-	-	-	-
BG 25	✓	✓	✓	-	-	✓	-
BG 26	✓	✓	-	-	-	-	-
BG 27	✓	✓	✓	-	-	-	-
BG 28	✓	✓	-	-	-	-	-
BG 29	✓	✓	✓	-	-	-	-
BG 30	✓	✓	-	-	-	-	-

หมายเหตุ : A ; Albite ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) , D ; Diopside ($\text{Ca}(\text{Mg}_{0.5}\text{Al}_{0.5})(\text{Al}_{0.5}\text{Si}_{1.5}\text{O}_6)$),

L ; Leucite (KAlSi_2O_6), H ; Hematite (Fe_2O_3), N ; Nepheline ($\text{Na}_{7.11}\text{Al}_{7.2}\text{Si}_{8.8}\text{O}_{32}$),

S ; Sodium Calcium Aluminum Silicate ($\text{NaCaAlSi}_2\text{O}_7$) และ C ; Cristobalite (SiO_2)



รูปที่ 4.1 องค์ประกอบทางเฟสของแก้วฐานบะซอลต์สูตรที่ 1 - 5

A ; Albite ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$)

D ; Diopside ($\text{Ca}(\text{Mg}_{0.5}\text{Al}_{0.5})(\text{Al}_{0.5}\text{Si}_{1.5}\text{O}_6)$)

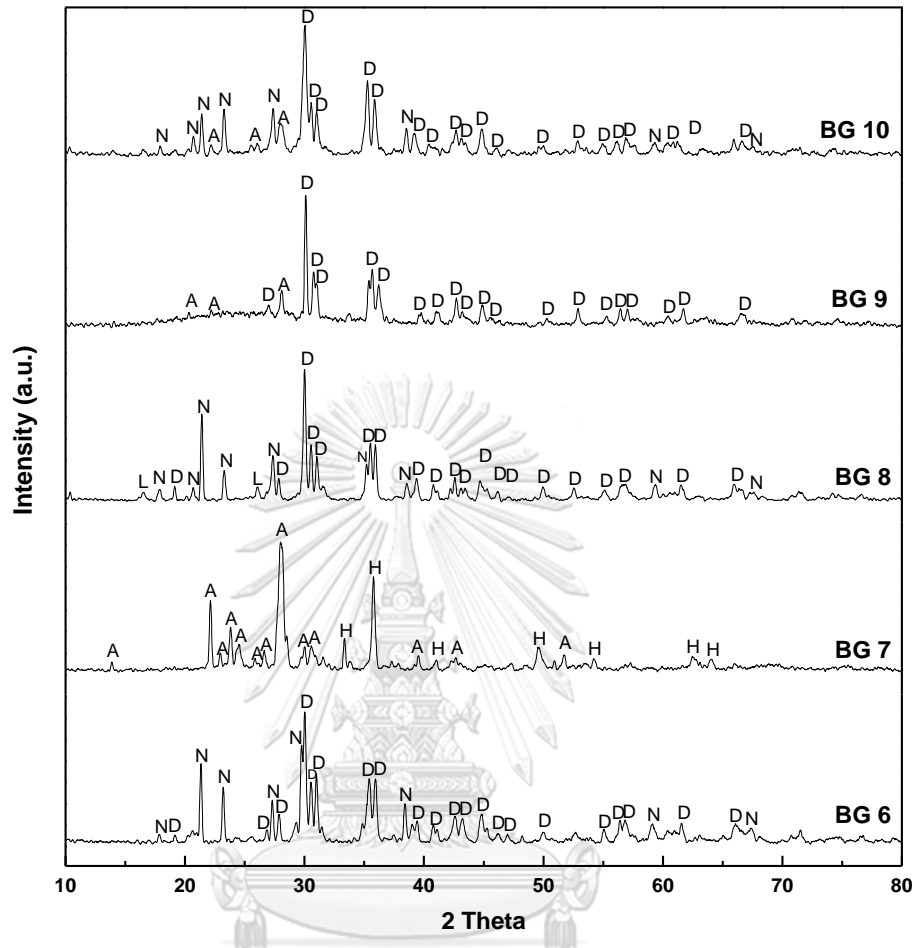
L ; Leucite (KAlSi_2O_6)

H ; Hematite (Fe_2O_3)

N ; Nepheline ($\text{Na}_{7.11}\text{Al}_{7.2}\text{Si}_{8.8}\text{O}_{32}$)

S ; Sodium Calcium Aluminum Silicate ($\text{NaCaAlSi}_2\text{O}_7$)

C ; Cristobalite (SiO_2)



รูปที่ 4.2 องค์ประกอบทางเฟสของแก้วฐานบะซอลต์สูตรที่ 6 – 10

A ; Albite ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$)

D ; Diopside ($\text{Ca}(\text{Mg}_{0.5}\text{Al}_{0.5})(\text{Al}_{0.5}\text{Si}_{1.5}\text{O}_6)$)

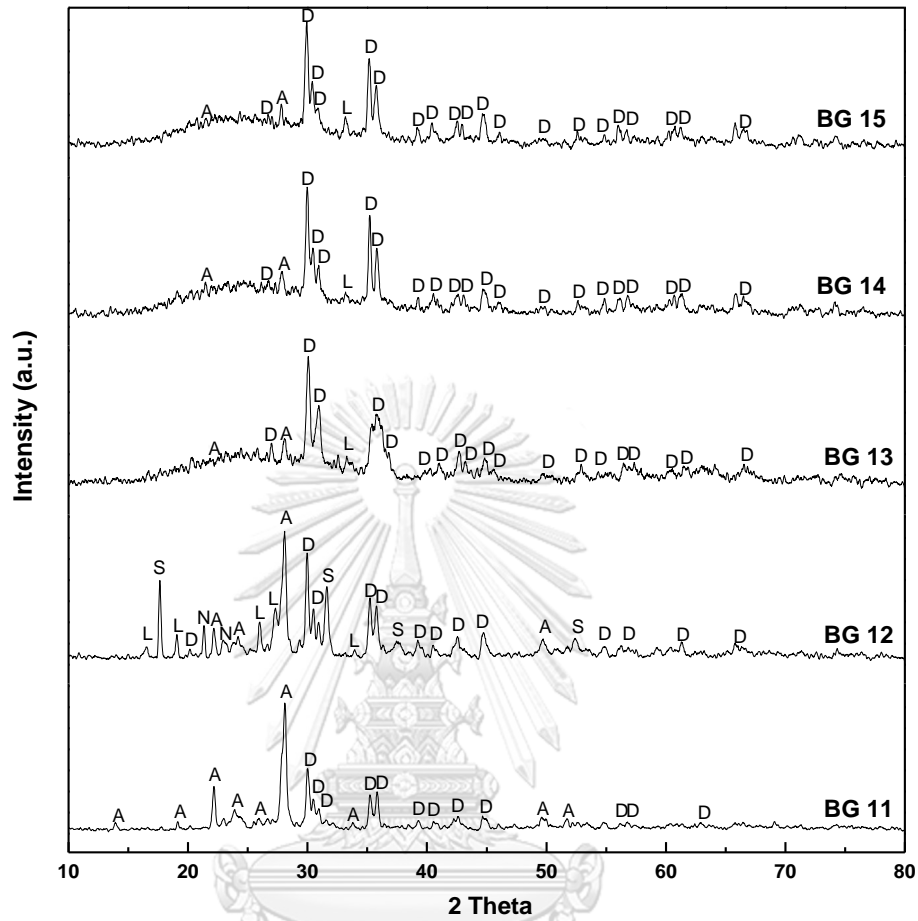
L ; Leucite (KAlSi_2O_6)

H ; Hematite (Fe_2O_3)

N ; Nepheline ($\text{Na}_{7.11}\text{Al}_{7.2}\text{Si}_{8.8}\text{O}_{32}$)

S ; Sodium Calcium Aluminum Silicate ($\text{NaCaAlSi}_2\text{O}_7$)

C ; Cristobalite (SiO_2)



รูปที่ 4.3 องค์ประกอบทางเฟสของแก้วฐานบะซอลต์สูตรที่ 11 - 15

A ; Albite ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$)

D ; Diopside ($\text{Ca}(\text{Mg}_{0.5}\text{Al}_{0.5})(\text{Al}_{0.5}\text{Si}_{1.5}\text{O}_6)$)

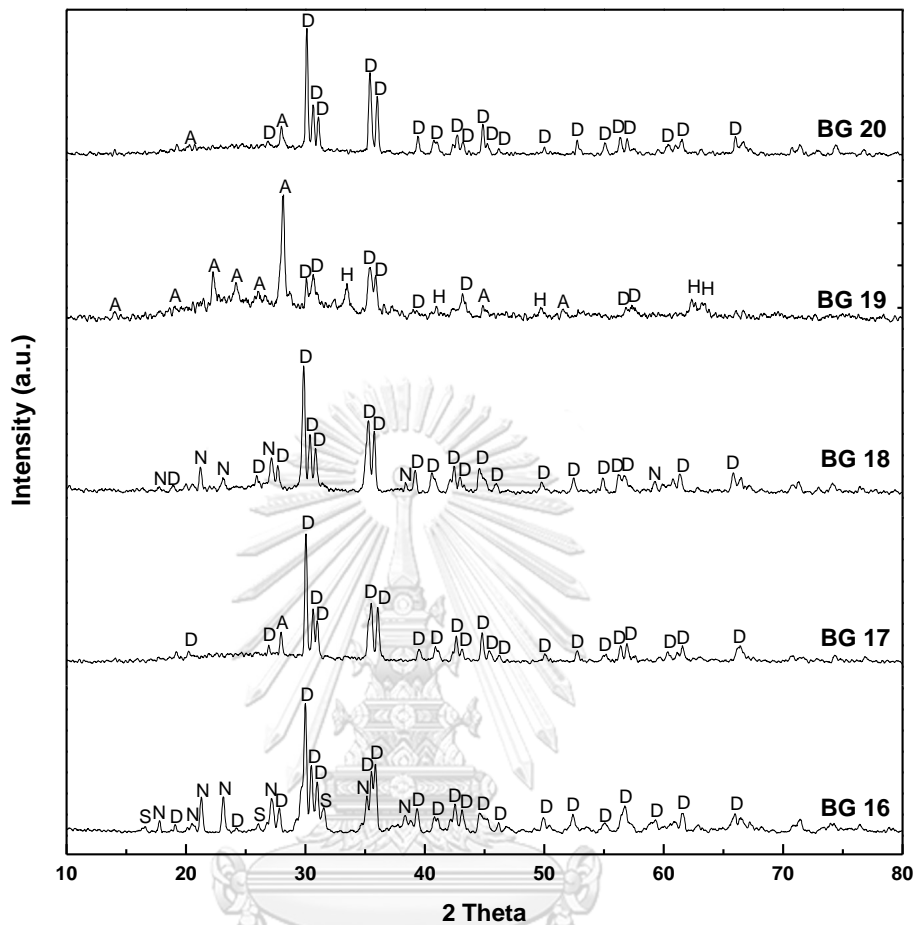
L ; Leucite (KAlSi_2O_6)

H ; Hematite (Fe_2O_3)

N ; Nepheline ($\text{Na}_{7.11}\text{Al}_{7.2}\text{Si}_{8.8}\text{O}_{32}$)

S ; Sodium Calcium Aluminum Silicate ($\text{NaCaAlSi}_2\text{O}_7$)

C ; Cristobalite (SiO_2)



รูปที่ 4.4 องค์ประกอบทางเฟสของแก้วฐานบะซอลต์สูตรที่ 16 – 20

A ; Albite ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$)

D ; Diopside ($\text{Ca}(\text{Mg}_{0.5}\text{Al}_{0.5})(\text{Al}_{0.5}\text{Si}_{1.5}\text{O}_6)$)

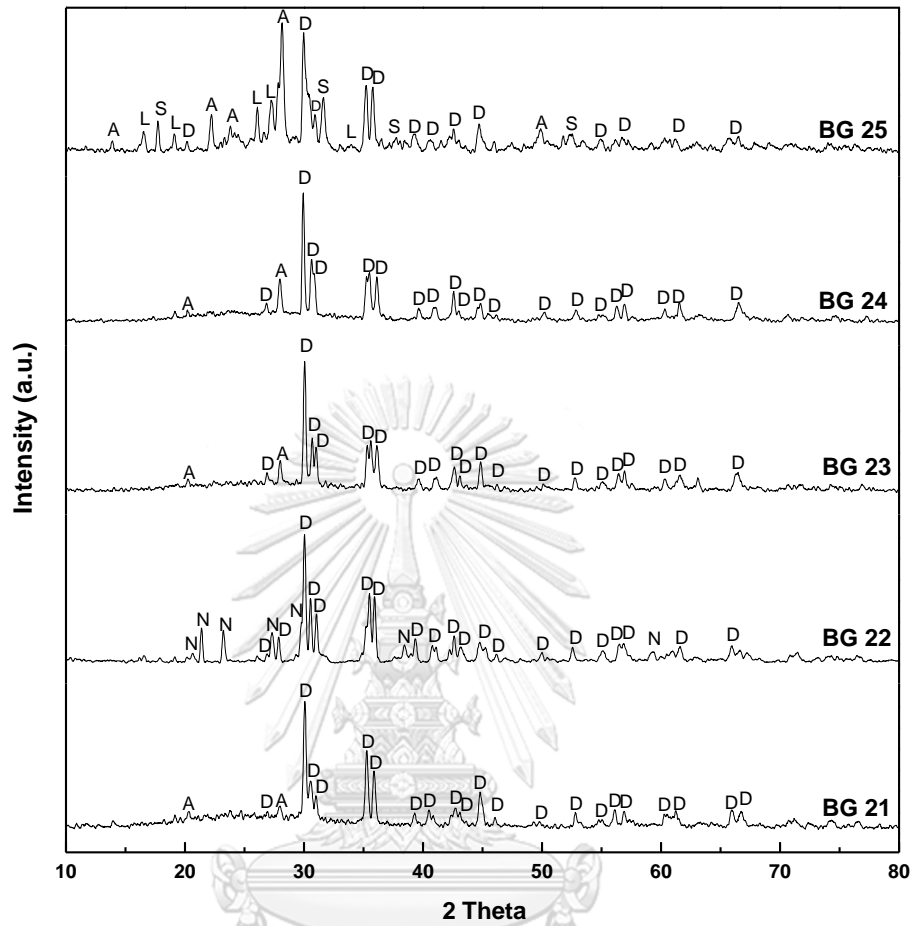
L ; Leucite (KAlSi_2O_6)

H ; Hematite (Fe_2O_3)

N ; Nepheline ($\text{Na}_{7.11}\text{Al}_{7.2}\text{Si}_{8.8}\text{O}_{32}$)

S ; Sodium Calcium Aluminum Silicate ($\text{NaCaAlSi}_2\text{O}_7$)

C ; Cristobalite (SiO_2)



รูปที่ 4.5 องค์ประกอบทางเฟสของแก้วฐานบะซอลต์สูตรที่ 21 – 25

A ; Albite ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$)

D ; Diopside ($\text{Ca}(\text{Mg}_{0.5}\text{Al}_{0.5})(\text{Al}_{0.5}\text{Si}_{1.5}\text{O}_6)$)

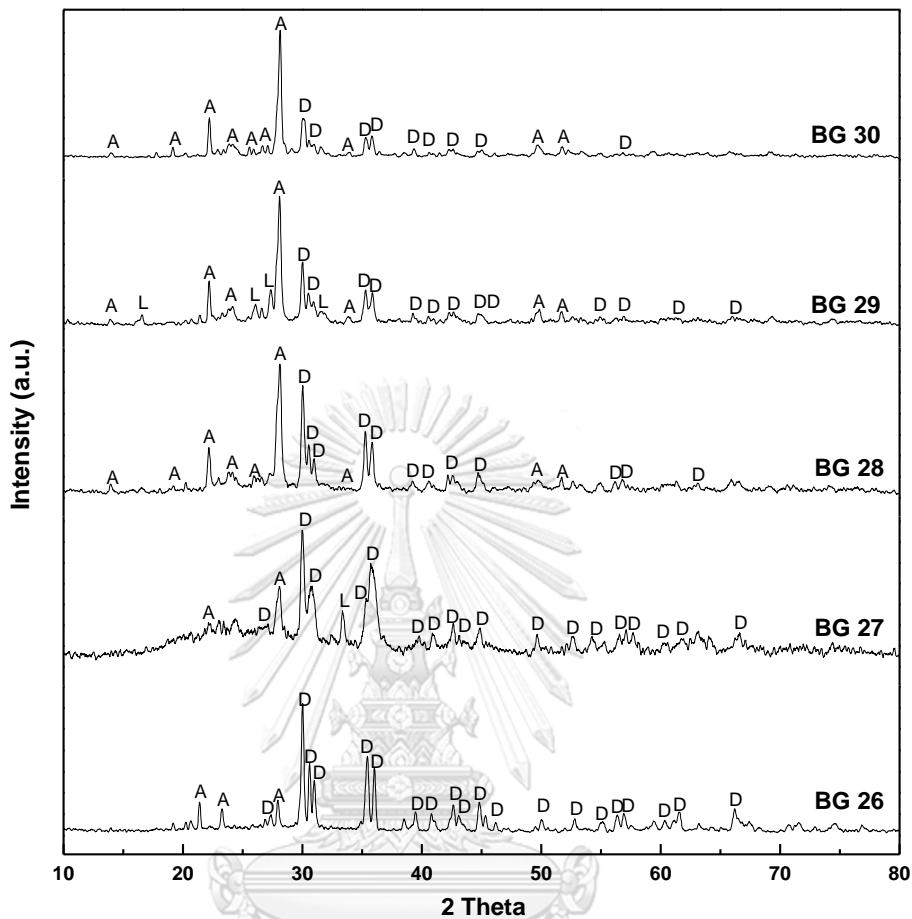
L ; Leucite (KAlSi_2O_6)

H ; Hematite (Fe_2O_3)

N ; Nepheline ($\text{Na}_{7.11}\text{Al}_{7.2}\text{Si}_{8.8}\text{O}_{32}$)

S ; Sodium Calcium Aluminum Silicate ($\text{NaCaAlSi}_2\text{O}_7$)

C ; Cristobalite (SiO_2)



รูปที่ 4.6 องค์ประกอบทางเฟสของแก้วฐานบะซอลต์สูตรที่ 26 – 30

A ; Albite ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$)

D ; Diopside ($(\text{Ca}(\text{Mg}_{0.5}\text{Al}_{0.5})(\text{Al}_{0.5}\text{Si}_{1.5}\text{O}_6))$)

L ; Leucite (KAlSi_2O_6)

H ; Hematite (Fe_2O_3)

N ; Nepheline ($\text{Na}_{7.11}\text{Al}_{7.2}\text{Si}_{8.8}\text{O}_{32}$)

S ; Sodium Calcium Aluminum Silicate ($\text{NaCaAlSi}_2\text{O}_7$)

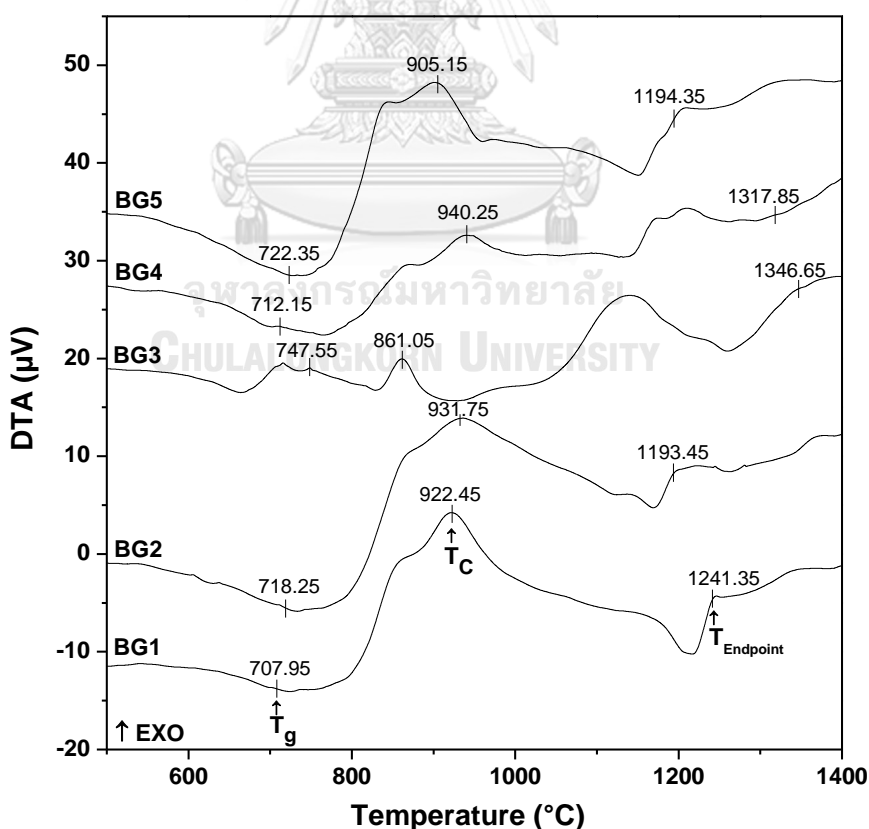
C ; Cristobalite (SiO_2)

4.3 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน

จากการนำแก้วพริตมาบดละเอียดร้อนผ่านตะแกรงขนาด 100 เมช และนำมาวิเคราะห์หาอุณหภูมิสภาพแก้ว (T_g) อุณหภูมิตกผลึก (T_c) จุดยุติ (T_{Endpoint}) และอุณหภูมิลiquidัส (T_L) โดยใช้เทคนิค DTA ให้ความร้อนในช่วงอุณหภูมิห้องถึง 1400 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที และวิเคราะห์ผลด้วย tangent method ได้ผลการทดลองดังต่อไปนี้

4.3.1 ผลการวัด T_g , T_c และ T_{Endpoint} ของแก้วด้วยเทคนิค DTA

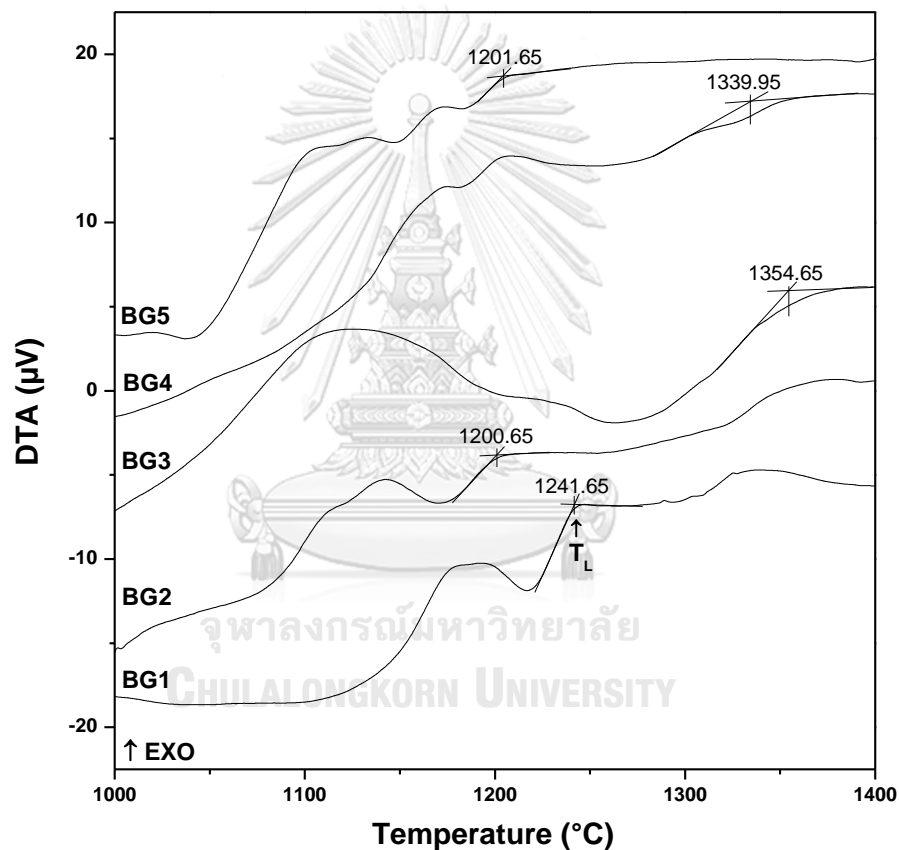
ผลการทดลองสมบัติทางความร้อนของแก้วฐานบะซอลต์ด้วยเทคนิค DTA พบว่า T_g , T_c และ T_{Endpoint} อยู่ในช่วง 611.55 - 779.05, 840.95 - 1106.05 และ 1193.45 - 1395.95 องศาเซลเซียส ตามลำดับ แสดงค่าดังตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.7 แสดง T_g , T_c และ T_{Endpoint} ของตัวอย่างสูตรแก้ว BG 1 - BG 5 ที่ได้จากเทคนิค DTA โดยค่า T_c ของแต่ละสูตรแก้วที่ได้จากการทดลองนั้นจะนำมาเป็นอุณหภูมิที่ใช้ในการทำให้แก้วตกผลึกโดยกระบวนการทางความร้อนที่ T_c ตรวจสอบองค์ประกอบเฟส และทดสอบหา T_L ด้วยเทคนิค DTA และ T_{Endpoint} ที่ได้นั้นเป็นจุดสิ้นสุดของปฏิกิริยาการดูดความร้อน (endothermic reaction) ของผลึกที่หลอมเหลว



รูปที่ 4.7 กราฟ DTA แสดงค่า T_g , T_c , T_{Endpoint} ของแก้วฐานบะซอลต์สูตรที่ 1 - 5

4.3.2 ผลการวัด T_L ของแก้วด้วยเทคนิค DTA

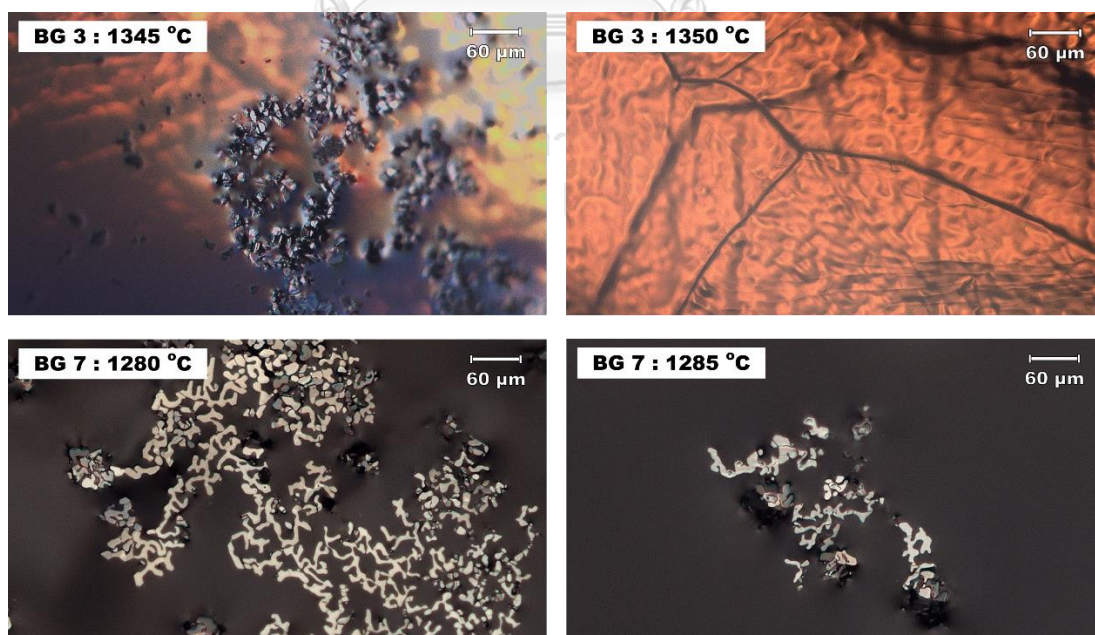
เมื่อนำผงแก้วที่ผ่านการอัดขึ้นรูปเป็นเม็ดผ่านกระบวนการทางความร้อนในเตา bottom loading ที่ T_c ของแก้วฐานบะซอลต์แต่ละสูตรที่ได้จากการวิเคราะห์ขั้นต้น เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที จากนั้นทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค DTA ให้ความร้อนในช่วงอุณหภูมิห้องถึง 1400 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที จะได้ค่า T_L อยู่ในช่วง 1198.45 - 1361.55 องศาเซลเซียส ดังตารางที่ 4.3 และแสดงตัวอย่างการวัดอุณหภูมิวิกฤตด้วยวิธี tangent ของสูตรแก้ว BG 1 – BG 5 ดังรูปที่ 4.8



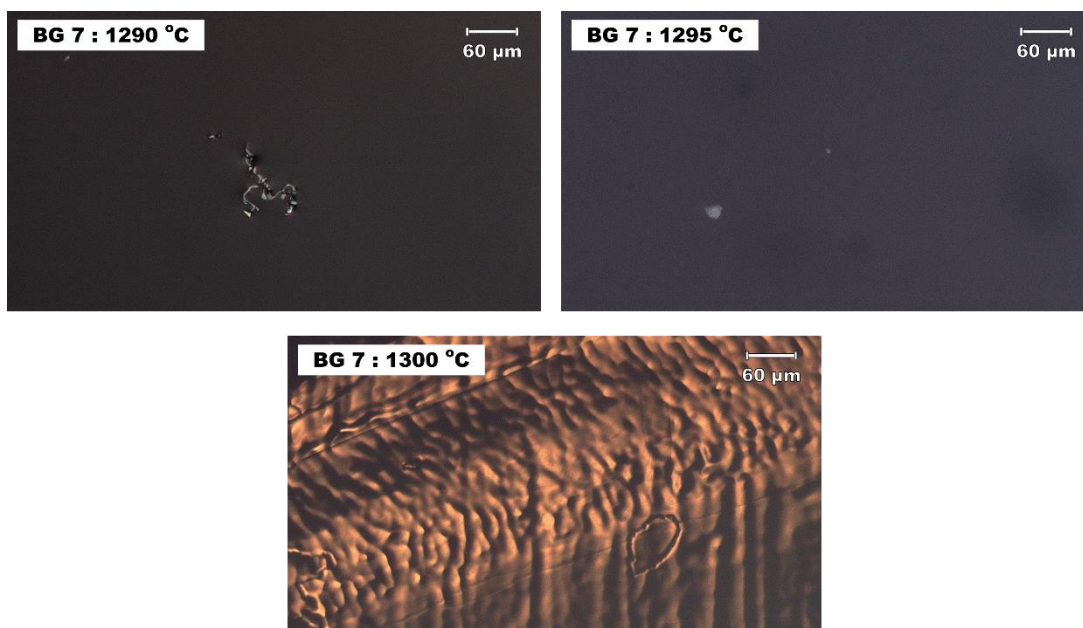
รูปที่ 4.8 กราฟ DTA แสดงค่า T_L ของแก้วฐานบะซอลต์สูตรที่ 1 - 5

4.3.3 ผลการวัด T_L ของแก้วด้วยวิธี Isothermal

จากการนำเม็ดผงแก้วที่ได้จากการอัดขึ้นรูปมาตัดแบ่งให้มีขนาดเล็กลง วางลงบนแผ่นแพลทินัม ให้ความร้อนที่ T_{Endpoint} ที่ได้จากกราฟวิเคราะห์ขั้นต้นของแต่ละสูตร เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที ในเตา bottom loading จากนั้นทำให้เย็นตัวอย่างฉับพลันในอากาศ แล้วนำไปตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์ เพื่อดูการหลอมเป็นน้ำแก้วอย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมินั้น ๆ ค่า T_L ที่ได้จากทดลองอยู่ในช่วง 1190 - 1350 องศาเซลเซียส แสดงค่าดังตารางที่ 4.3 และ ในรูปที่ 4.9 แสดงตัวอย่างแก้วสูตร BG 3 และ BG 7 ที่มีค่า T_{Endpoint} จากเทคนิค DTA เท่ากับ 1346.65 และ 1281.25 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เมื่อนำไปคงอุณหภูมิที่ 1345 องศาเซลเซียส สำหรับแก้วสูตร BG 3 และ 1280 องศาเซลเซียส สำหรับแก้วสูตร BG 7 เป็นเวลา 24 ชั่วโมงและตรวจสอบผลึกที่เกิดขึ้นด้วยกล้องจุลทรรศน์ พบว่า แก้วสูตร BG 3 และ BG 7 ยังคงมีผลึกเหลืออยู่ เนื่องจากหลอมไม่หมดของผลึกที่อุณหภูมิสูง หรือเกิดการตกผลึกในขณะที่ทำให้เย็นตัวอย่างฉับพลันในอากาศ จึงเพิ่มการคงอุณหภูมิจากเดิมอีกครั้งละ 5 องศาเซลเซียส พบว่าแก้วสูตร BG 3 หลอมได้อย่างสมบูรณ์ ที่ 1350 องศาเซลเซียส และแก้วสูตร BG 7 ที่ 1300 องศาเซลเซียส ดังนั้น T_L ของแก้ว BG 3 เท่ากับ 1347.5 องศาเซลเซียส และแก้ว BG 7 เท่ากับ 1297.5 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิกึ่งกลางระหว่างอุณหภูมิสุดท้ายที่พบผลึกเหลืออยู่และอุณหภูมิที่ไม่พบผลึก (หลอมเป็นแก้วหมด)

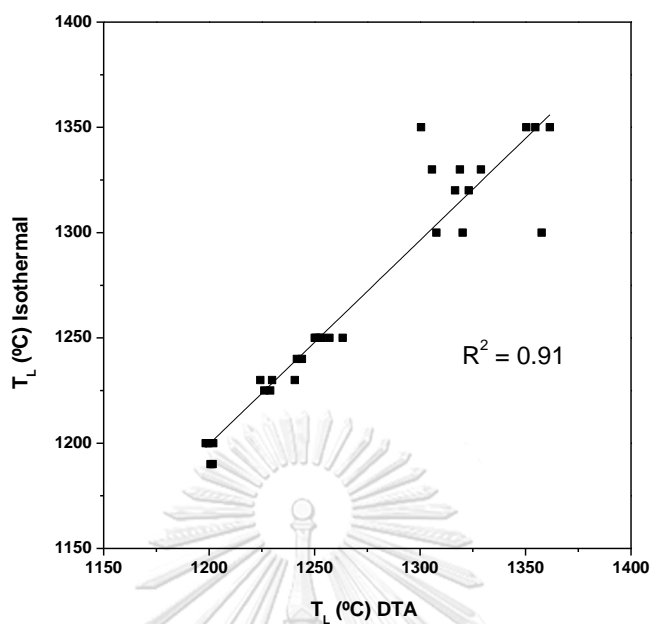


รูปที่ 4.9 ตัวอย่างแก้วสูตร BG 3 และBG 7



รูปที่ 4.9 (ต่อ) ตัวอย่างแก้วสูตร BG 3 และBG 7

เมื่อพล็อตกราฟเปรียบเทียบ T_L ที่ได้จากทั้ง 2 วิธี ดังรูปที่ 4.10 เพื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (coefficient of determination, R^2) พบว่าค่า R^2 เท่ากับ 0.91 ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้ ดังนั้นวิธีการตรวจสอบ T_L ด้วยเทคนิค DTA และ Isothermal สามารถทำได้ทั้ง 2 วิธี ซึ่งวิธี Isothermal นั้นเป็นวิธีที่นำตัวอย่างแก้วไปให้ความร้อนเพื่อหาจุดที่แก้วหลอมเป็นของเหลวอย่างสมบูรณ์ จึงมีความน่าเชื่อถือ และแม่นยำ แต่ใช้เวลานาน สำหรับเทคนิค DTA นั้น เป็นเทคนิคที่สะดวก รวดเร็วกว่า เนื่องจากสามารถวิเคราะห์ตัวอย่างด้วยการให้ความร้อนเพียงครั้งเดียว นอกจากนี้ มีปริมาณออกไซด์ในแต่ละสูตรแก้วมีผลทำให้ค่า T_L ที่ได้แตกต่างกัน ยกตัวอย่าง เช่น การเติม Al_2O_3 และ Fe_2O_3 มาก ทำให้ T_C ที่ได้มีค่าสูง จึงส่งผลให้ $T_{Endpoint}$ และ T_L ที่ได้มีค่าสูงตามหรือการเติมฟลักซ์ (flux) เพื่อช่วยลดอุณหภูมิการหลอม



รูปที่ 4.10 กราฟเปรียบเทียบ T_L จากเครื่อง DTA และวิธี Isothermal

ตารางที่ 4.3 ค่าอุณหภูมิสภาพแก้ว (T_g) อุณหภูมิตกผลึก (T_c) จุดยุติ (T_{Endpoint}) และ
อุณหภูมิลิควิดัส (T_L) จาก DTA และ Isothermal

สูตร	T_g (°C)	T_c (°C)	T_{Endpoint} (°C)	T_L (°C) DTA	T_L (°C) Isothermal
BG 1	707.95	922.45	1241.35	1241.65	1240.0
BG 2	718.25	931.75	1193.45	1200.65	1190.0
BG 3	747.55	861.05	1346.65	1354.65	1347.5
BG 4	712.15	940.25	1317.85	1307.75	1300.0
BG 5	722.35	905.15	1194.35	1201.65	1190.0
BG 6	660.75	859.65	1226.95	1226.15	1225.0
BG 7	779.05	1106.05	1281.25	1357.65	1297.5
BG 8	655.85	915.95	1257.35	1257.05	1250.0
BG 9	682.45	943.35	1338.55	1320.25	1302.5

ตารางที่ 4.3 (ต่อ) ค่าอุณหภูมิสภาพแก้ว (T_g) อุณหภูมิตกผลึก (T_c) จุดยุติ (T_{Endpoint}) และ อุณหภูมิ
ลิควิดัส (T_L) จาก DTA และ Isothermal

สูตร	T_g (°C)	T_c (°C)	T_{Endpoint} (°C)	T_L (°C)	
				DTA	Isothermal
BG 10	724.45	941.85	1229.65	1228.95	1225.0
BG 11	713.05	939.05	1203.15	1201.95	1200.0
BG 12	705.05	944.15	1197.15	1199.75	1200.0
BG 13	611.55	840.95	1339.35	1328.85	1332.5
BG 14	629.25	876.55	1377.85	1305.65	1332.5
BG 15	633.05	876.55	1395.95	1318.95	1332.5
BG 16	661.05	898.05	1241.05	1252.45	1247.5
BG 17	665.15	855.25	1228.55	1229.85	1230.0
BG 18	657.35	854.35	1228.85	1240.65	1230.0
BG 19	726.75	1004.85	1387.05	1350.35	1352.5
BG 20	643.35	877.15	1224.35	1224.35	1227.5
BG 21	675.05	871.35	1326.65	1300.45	1347.5
BG 22	678.15	907.05	1250.95	1250.75	1250.0
BG 23	679.55	887.55	1237.85	1250.05	1247.5
BG 24	686.75	960.95	1231.35	1253.35	1247.5
BG 25	696.35	950.55	1320.65	1316.65	1320.0
BG 26	685.65	876.35	1242.05	1244.05	1240.0
BG 27	697.75	852.05	1234.15	1323.15	1317.5
BG 28	685.65	960.75	1236.55	1263.35	1247.5
BG 29	737.25	956.25	1378.05	1361.55	1352.5
BG 30	694.05	952.35	1194.75	1198.45	1197.5

4.4 คำนวณหา T_L

จากผลการทดลองการวัด T_L ด้วยเทคนิค DTA และ Isothermal นั้น นำมาคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ขององค์ประกอบ (b_i) ด้วยการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ เพื่อสร้างสมการคำนวณ T_L โดยแบ่งการคำนวณออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ตามเฟสหลักที่เกิดขึ้น ได้แก่ กลุ่มของเฟสไดออปไซด์ และเฟสแอลไบต์ของแก้วฐานบะซอลต์ ได้ค่าดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ค่าสัมประสิทธิ์ขององค์ประกอบ (b_i) ของเทคนิค DTA และ Isothermal

b_i	เฟสไดออปไซด์ (Diopside)		เฟสแอลไบต์ (Albite)	
	เทคนิค DTA	Isothermal	เทคนิค DTA	Isothermal
b_0	966.00	9002.16	-8138.52	7546.52
$b_{1_{SiO_2}}$	941.39	-3975.86	3295.99	-5251.08
$b_{2_{CaO}}$	-226.79	-8295.55	8364.77	-7012.64
$b_{3_{Al_2O_3}}$	708.15	-7226.23	12859.62	-3923.62
$b_{4_{MgO}}$	451.44	-6534.49	10514.38	-3200.87
$b_{5_{Fe_2O_3}}$	2001.84	-10615.03	16622.08	-8201.45
$b_{6_{Na_2O}}$	-2599.31	-11656.26	14882.53	-3415.49
$b_{7_{K_2O}}$	-3059.69	-14518.08	11231.47	-8948.50
$b_{8_{TiO_2}}$	-46439.29	-49603.95	115325.93	41916.43
R^2	0.79	0.72	0.82	0.73

จากตารางที่ 4.4 เขียนสมการได้ดังนี้

สมการคำนวณ T_L สำหรับเทคนิค DTA

$$\begin{aligned}
 T_L(\text{Cal:DTA})_D = & -966.00 + 941.39 (g_1)_{SiO_2} - 226.79 (g_2)_{CaO} + 708.15 (g_3)_{Al_2O_3} \\
 & + 451.44 (g_4)_{MgO} + 2001.84 (g_5)_{Fe_2O_3} - 2599.31 (g_6)_{Na_2O} \\
 & - 3059.69 (g_7)_{K_2O} - 46439.29 (g_8)_{TiO_2}
 \end{aligned}
 \tag{สมการ 4.1}$$

$$\begin{aligned}
 T_L(\text{Cal:DTA})_A = & - 8138.52 + 3295.99 (g_1)_{\text{SiO}_2} + 8364.77 (g_2)_{\text{CaO}} \\
 & + 12859.62 (g_3)_{\text{Al}_2\text{O}_3} + 10514.38 (g_4)_{\text{MgO}} + 16622.08 (g_5)_{\text{Fe}_2\text{O}_3} \\
 & + 14882.53 (g_6)_{\text{Na}_2\text{O}} + 11231.47 (g_7)_{\text{K}_2\text{O}} + 115325.93 (g_8)_{\text{TiO}_2}
 \end{aligned}$$

สมการ 4.2

สมการคำนวณ T_L สำหรับเทคนิค Isothermal

$$\begin{aligned}
 T_L(\text{Cal:Iso})_D = & 9002.16 - 3975.86 (g_1)_{\text{SiO}_2} - 8294.55 (g_2)_{\text{CaO}} \\
 & - 7226.23 (g_3)_{\text{Al}_2\text{O}_3} - 6534.49 (g_4)_{\text{MgO}} - 10615.03 (g_5)_{\text{Fe}_2\text{O}_3} \\
 & - 11656.26 (g_6)_{\text{Na}_2\text{O}} - 14518.08 (g_7)_{\text{K}_2\text{O}} - 49603.95 (g_8)_{\text{TiO}_2}
 \end{aligned}$$

สมการ 4.3

$$\begin{aligned}
 T_L(\text{Cal:Iso})_A = & 7546.52 - 5251.08 (g_1)_{\text{SiO}_2} - 7012.64 (g_2)_{\text{CaO}} \\
 & - 3923.62 (g_3)_{\text{Al}_2\text{O}_3} - 3200.87 (g_4)_{\text{MgO}} - 8201.45 (g_5)_{\text{Fe}_2\text{O}_3} \\
 & - 3415.49 (g_6)_{\text{Na}_2\text{O}} - 8948.50 (g_7)_{\text{K}_2\text{O}} - 41916.43 (g_8)_{\text{TiO}_2}
 \end{aligned}$$

สมการ 4.4

เมื่อแทนค่าเศษส่วนโมล (g_i) ของแต่ละองค์ประกอบของสูตรแก้วที่มีเฟสไดออปไซด์ และ เฟสแอลไบต์ ที่เป็นเฟสหลัก (จากความเข้มพีก XRD) ลงไปในสมการ เพื่อคำนวณหา T_L แสดงค่า T_L ของเฟสไดออปไซด์ดังตารางที่ 4.5 และเฟสแอลไบต์ดังตารางที่ 4.6 และนำค่า T_L ที่จากคำนวณมา พล็อตกราฟเปรียบเทียบกับ T_L ที่ได้จากการวัดด้วยเทคนิค DTA และ Isothermal เพื่อพิจารณาจาก ค่า R^2 พบว่า สูตรแก้วที่มีเฟสไดออปไซด์เป็นเฟสหลัก เทคนิค DTA มีค่าเท่ากับ 0.79 และ เทคนิค Isothermal มีค่าเท่ากับ 0.72 ดังรูปที่ 4.11 และรูปที่ 4.12 ตามลำดับ โดยค่า R^2 ที่ได้ของแต่ละ วิธีการวัด T_L มีความเข้าใจ 1 จึงสามารถนำสมการ 4.1 และสมการ 4.3 มาใช้การคำนวณหา T_L ของสูตรแก้วที่มีเฟสไดออปไซด์เป็นเฟสหลักและองค์ประกอบทางเคมีใกล้เคียงกันได้ สำหรับสูตรแก้ว ที่มีเฟสแอลไบต์เป็นเฟสหลักนั้น มีค่า R^2 ของเทคนิค DTA มีค่าเท่ากับ 0.81 และ เทคนิค Isothermal มีค่าเท่ากับ 0.73 ดังรูปที่ 4.13 และรูปที่ 4.14 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าเข้าใจ 1 ดังนั้น สมการ 4.2 และ สมการ 4.4 สามารถนำมาคำนวณหา T_L ได้เช่นกัน และเมื่อเปรียบเทียบระหว่าง วิธีการวัด T_L ด้วยเทคนิค DTA และ Isothermal ทั้ง 2 เฟส จากค่า R^2 ที่ได้นั้น เทคนิค DTA มีค่า มากกว่า จึงสรุปได้ว่าแบบจำลองที่ใช้ข้อมูลอุณหภูมิวิกฤตที่ได้จากการวัดด้วยเทคนิค DTA สามารถให้ผลการคำนวณที่ใกล้เคียงกับการทดลองมากกว่า แบบจำลองที่ได้จากการวัดด้วยวิธี Isothermal และค่า T_L ที่วัดได้ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการคำนวณ สำหรับเทคนิค Isothermal ค่า

R^2 ที่ได้นั้นอยู่ในค่าที่สามารถนำสมการมาใช้ในการคำนวณได้เช่นกัน ซึ่งในการทดลองอาจมีข้อผิดพลาดในการควบคุมอุณหภูมิ และอาจเกิดการตกผลึกในขณะที่ทำให้เย็นตัวอย่างฉับพลันในอากาศทำให้อุณหภูมิวิกฤตที่วัดได้มีค่าสูงกว่าที่ควรเป็น

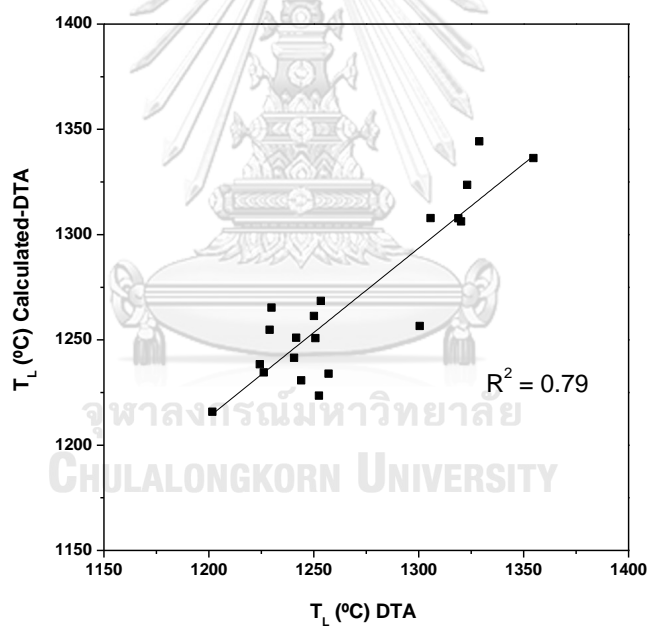
นอกจากนี้ค่า b_i ของแต่ละสารประกอบออกไซด์จากตารางที่ 4.4 นั้นมีผลต่อ T_L ที่คำนวณได้ ซึ่งค่า b_i ที่เป็นบวก จะให้ T_L ที่ได้มีค่าสูง และค่า b_i ที่ติดลบ ทำให้ค่า T_L ที่ได้ลดลง ซึ่งสอดคล้องกับองค์ประกอบออกไซด์ที่อยู่ในแต่ละสูตรแก้ว ยกตัวอย่างสูตรแก้วที่มีเฟสไดออปไซด์เป็นเฟสหลัก หากต้องการลด T_L สำหรับเทคนิค DTA นั้นควรมีการเพิ่มปริมาณ Na_2O K_2O และ TiO_2 ลงไปในแต่ละสูตรแก้ว เนื่องจากค่า $b_{6\text{Na}_2\text{O}}$ $b_{7\text{K}_2\text{O}}$ และ $b_{8\text{TiO}_2}$ มีค่าติดลบมาก หรือลดปริมาณ Fe_2O_3 ซึ่งมีค่า $b_{5\text{Fe}_2\text{O}_3}$ เป็นบวก จะทำให้ T_L ที่ได้ลดลงเช่นกัน ดังนั้นหากต้องการปรับเพิ่ม-ลด T_L ในกระบวนการหลอมแก้วเพื่อลดพลังงาน และค่าใช้จ่ายนั้น สามารถพิจารณาค่าบวก-ลบของ b_i ขององค์ประกอบออกไซด์ เพื่อนำมาปรับปริมาณสารประกอบออกไซด์ที่เติมลงในสูตรแก้ว นอกจากนี้การเติมสารประกอบแอลคาไลน์ ซึ่งเป็นตัวทำลายโครงข่ายซิลิกา (network modifier) จะทำให้เกิดการสลายพันธะของออกซิเจนที่เชื่อมต่อระหว่างซิลิกาเตตระฮีดรอน (non-bridging oxygen) ในโครงข่ายของแก้ว ส่งผลให้ความหนืด และอุณหภูมิการหลอมแก้วลดลงเช่นเดียวกัน

ตารางที่ 4.5 ค่า T_L ที่ได้จากคำนวณของสูตรแก้วที่มีเฟสไดออปไซด์เป็นเฟสหลัก

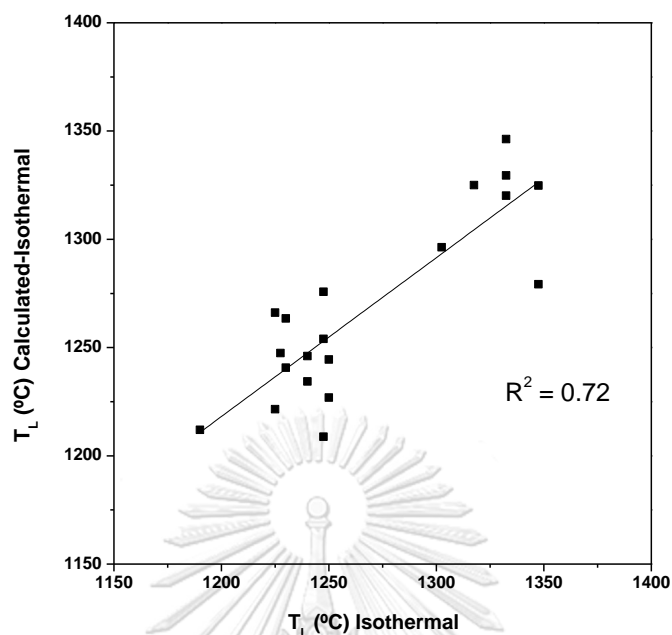
สูตร	T_L (°C) Cal-DTA _D	T_L (°C) Cal-Iso _D
BG 1	1251.03	1246.02
BG 3	1336.37	1324.82
BG 5	1215.89	1211.98
BG 6	1234.51	1221.48
BG 8	1233.93	1226.90
BG 9	1306.27	1296.31
BG 10	1254.83	1266.08
BG 13	1344.30	1346.22
BG 14	1307.79	1329.49
BG 15	1307.68	1320.17
BG 16	1223.49	1208.84
BG 17	1265.30	1263.42

ตารางที่ 4.5 (ต่อ) ค่า T_L ที่ได้จากคำนวณของสูตรแก้วที่มีเฟสไดออปไซด์เป็นเฟสหลัก

สูตร	T_L (°C) Cal-DTA _D	T_L (°C) Cal-Iso _D
BG 18	1241.48	1240.65
BG 20	1238.41	1247.42
BG 21	1256.61	1279.23
BG 22	1250.84	1244.42
BG 23	1261.34	1253.96
BG 24	1268.45	1275.73
BG 26	1230.79	1234.31
BG 27	1323.59	1325.06



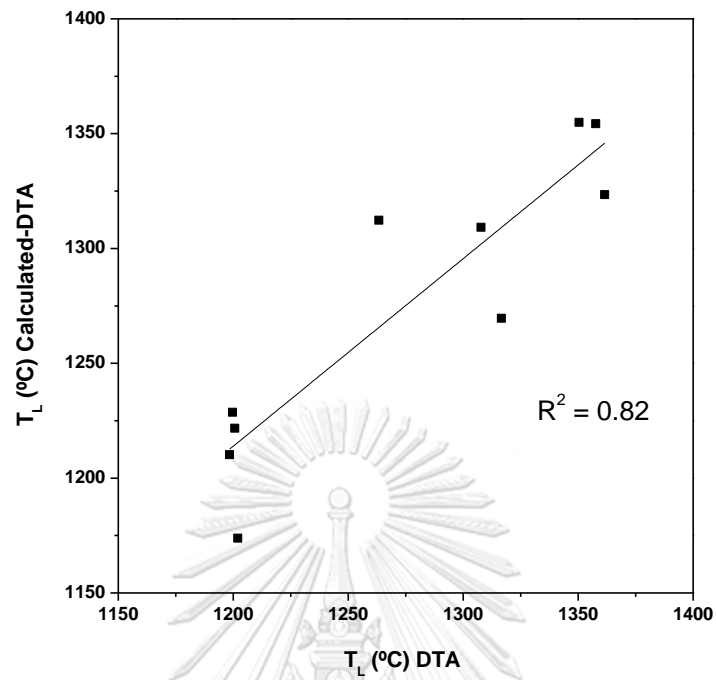
รูปที่ 4.11 กราฟเปรียบเทียบ T_L ที่ได้จากการวัดด้วยเทคนิค DTA และคำนวณของสูตรแก้วที่มีเฟสไดออปไซด์เป็นเฟสหลัก



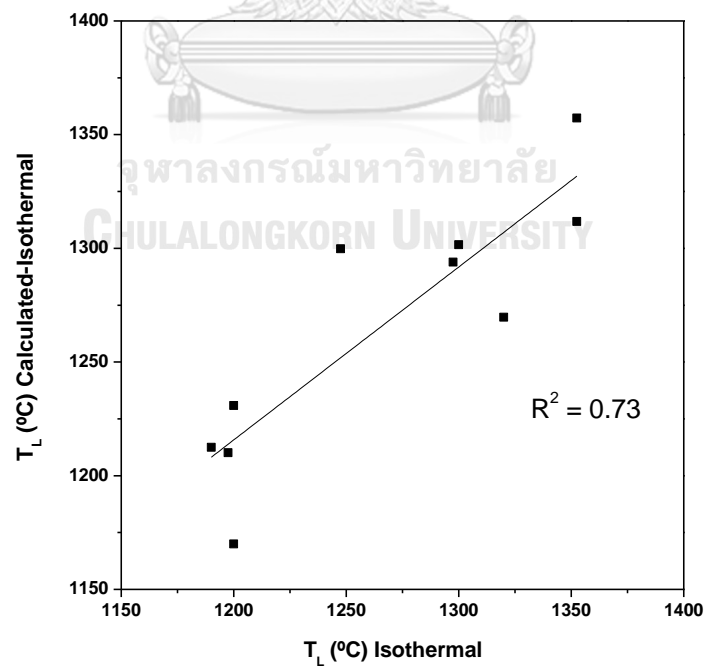
รูปที่ 4.12 กราฟเปรียบเทียบ T_L ที่ได้จากการวัดด้วยเทคนิค Isothermal และคำนวณของสูตรแก้วที่มีเฟสไดออปไซด์เป็นเฟสหลัก

ตารางที่ 4.6 ค่า T_L ที่ได้จากคำนวณของสูตรแก้วที่มีเฟสแอลไบต์เป็นเฟสหลัก

สูตร	T_L (°C) Cal-DTA	T_L (°C) Cal-Iso
BG 2	1221.71	1212.48
BG 4	1309.25	1301.61
BG 7	1354.27	1293.89
BG 11	1173.86	1170.01
BG 12	1228.62	1230.82
BG 19	1354.88	1357.33
BG 25	1269.55	1269.72
BG 28	1312.30	1299.76
BG 29	1323.45	1311.82
BG 30	1210.22	1210.06



รูปที่ 4.13 กราฟเปรียบเทียบ T_L ที่ได้จากการวัดด้วยเทคนิค DTA และคำนวณของสูตรแก้วที่มีเฟสแอลไบต์เป็นเฟสหลัก



รูปที่ 4.14 กราฟเปรียบเทียบ T_L ที่ได้จากการวัดด้วยเทคนิค Isothermal และคำนวณของสูตรแก้วที่มีเฟสแอลไบต์เป็นเฟสหลัก

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการหาอุณหภูมิวิกฤตของแก้วฐานบะซอลต์สำหรับการขึ้นรูปเส้นใยในระบบของ SiO_2 - CaO - Al_2O_3 - MgO - Fe_2O_3 - Na_2O - K_2O จากหินบะซอลต์ สรุปผลได้ดังนี้

1. องค์ประกอบทางเคมีของแก้วฐานบะซอลต์ที่เตรียมได้นั้น อยู่ในช่วงสามารถนำมาขึ้นรูปเป็นเส้นใยแก้วได้
2. ผลการศึกษาองค์ประกอบทางเฟสของแก้วฐานบะซอลต์ พบเฟสหลักคือ เฟสไดออปไซด์ (diopside; $\text{Ca}(\text{Mg}_{0.5}\text{Al}_{0.5})(\text{Al}_{0.5}\text{Si}_{1.5}\text{O}_6)$) และเฟสรองคือ เฟสแอลไบต์ (albite; $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) และพบเฟสลูไซต์ (leucite; KAlSi_2O_6) และเฟสเนฟลิ้น (nepheline; $\text{Na}_{7.11}\text{Al}_{7.2}\text{Si}_{8.8}\text{O}_{32}$) เกิดขึ้น เนื่องจากชนิดของหินบะซอลต์ที่ใช้เป็นหินชนิดโทลีโอต์กึ่งแอลคาไลน์ และองค์ประกอบทางเคมีของแก้วฐานบะซอลต์ที่เตรียมได้
3. ผลการวัด T_g , T_c และ T_{Endpoint} ของแก้วฐานบะซอลต์อยู่ในช่วง 611.55 - 779.05, 840.95 - 1106.05 และ 1193.45 - 1395.95 องศาเซลเซียส
4. ผลการวัด T_L ของแก้วฐานบะซอลต์อยู่ในช่วง 1198.45 - 1361.55 องศาเซลเซียส สำหรับเทคนิค DTA และ 1190 - 1350 องศาเซลเซียส สำหรับเทคนิค Isothermal เมื่อนำมาพล็อตกราฟเพื่อพิจารณาค่า R^2 ได้เท่ากับ 0.91 ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้ ดังนั้นวิธีการตรวจสอบอุณหภูมิวิกฤตด้วยเครื่อง DTA และ วิธี Isothermal สามารถทำได้ทั้ง 2 วิธี
5. การสร้างสมการคำนวณอุณหภูมิวิกฤต แบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ตามเฟสหลักที่เกิดขึ้นของแก้วฐานบะซอลต์คือเฟสไดออปไซด์ และเฟสแอลไบต์ มาใช้ในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ขององค์ประกอบ (b) และเมื่อนำค่าอุณหภูมิวิกฤตที่ได้จากคำนวณมาพล็อตกราฟเปรียบเทียบกับอุณหภูมิวิกฤตที่ได้จากการวัดด้วยเทคนิค DTA และ Isothermal ดังพิจารณาจากค่า R^2 พบว่า สูตรแก้วที่มีเฟสไดออปไซด์เป็นเฟสหลัก มีค่า R^2 ของเทคนิค DTA มีค่าเท่ากับ 0.79 และ เทคนิค Isothermal มีค่าเท่ากับ 0.72 และสูตรแก้วที่มีเฟสแอลไบต์เป็นเฟสหลักนั้น มีค่า R^2 ของเทคนิค DTA มีค่าเท่ากับ 0.82 และ เทคนิค Isothermal มีค่าเท่ากับ 0.73 ซึ่งค่า R^2 ที่ได้นั้นมีค่าเข้าใกล้ 1 ซึ่งถือว่าสามารถนำมาใช้ในการคำนวณหาอุณหภูมิวิกฤตในองค์ประกอบแก้วที่ใกล้เคียงกันและมีองค์ประกอบทางเฟสเดียวกันได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

การวัดอุณหภูมิวิกฤตด้วยเทคนิค DTA และ Isothermal นั้นควรทำการทดลองอย่างน้อย 3 ครั้ง เพื่อดูความแปรปรวนของอุณหภูมิที่วัดได้ เพื่อที่จะได้ค่าที่แม่นยำไปสร้างสมการในการคำนวณอุณหภูมิวิกฤตได้ รวมถึงการ heat treated ที่อุณหภูมิ T_c ของแก้วทุกสูตรเหมือนกัน โดยเริ่มจากอุณหภูมิ T_c ต่ำสุดที่วัดได้ ไปจนถึงสูงสุด เพื่อดูความแตกต่างของเฟสที่จะเกิดขึ้น



รายการอ้างอิง

1. Deák, T. and Czigány, T. 2009. Chemical Composition and Mechanical Properties of Basalt and Glass Fibers: A Comparison. Textile Research Journal 79: 645-651.
2. Manylov, M.S., Gutnikov, S.I., Pokholok, K.V., Lazoryak, B.I., and Lipatov, Y.V. 2013. Crystallization mechanism of basalt glass fibers in air. Mendeleeev Communications 23: 361-363.
3. ต่อศักดิ์ ประสมทรัพย์. (2548). ศิลาวรรณนาและโครงสร้างของหินบะซอลต์ในประเทศไทย. พิมพ์ครั้งที่ 1 กรุงเทพมหานคร: กองวิเคราะห์และตรวจสอบทรัพยากรธรณีกรมทรัพยากรธรณี กรมทรัพยากรธรณี.
4. กรมทรัพยากรธรณี. 2551. แหล่งเรียนรู้ทางธรณีวิทยาจังหวัดลพบุรี[ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://www.dmr.go.th/download/article/article_20110209135235.pdf [10 กุมภาพันธ์ 2560]
5. Reben, M. and Li, H. 2011. Thermal Stability and Crystallization Kinetics of MgO–Al₂O₃–B₂O₃–SiO₂ Glasses. International Journal of Applied Glass Science 2: 96-107.
6. กรมสวัสดิการและคุ้มครองแรงงาน. (2548). สถานการณ์การใช้แร่ใยหิน สถานะสุขภาพ และสภาพแวดล้อมในการทำงาน ในสถานประกอบกิจการที่มีการใช้แร่ใยหิน. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร บริษัท เรียงสาม กราฟฟิค ดีไซน์ จำกัด.
7. Dorigato, A. and Pegoretti, A. 2012. Fatigue resistance of basalt fibers-reinforced laminates. Journal of Composite Materials 46: 1773-1785.
8. Smedskjaer, M.M., Solvang, M., and Yue, Y. 2010. Crystallisation behaviour and high-temperature stability of stone wool fibres. Journal of the European Ceramic Society 30: 1287-1295.
9. Greco, A., Maffezzoli, A., Casciaro, G., and Caretto, F. 2014. Mechanical properties of basalt fibers and their adhesion to polypropylene matrices. Composites Part B: Engineering 67: 233-238.
10. Fiore, V., Scalici, T., Di Bella, G., and Valenza, A. 2015. A review on basalt fibre and its composites. Composites Part B: Engineering 74: 74-94.

11. นิคม จีงอยู่สุข. (2541). โยหินสังเคราะห์ (Rock Wool) จากหินบะซอลต์. บุรีรัมย์ : กรมทรัพยากร กองธรณีวิทยา:
12. Kaewploy, S. The Optimization of Developed Formula for Chicken Ball Mixed with domestic Vegetables by Design of Experiment Method. in Rethink : Social Development for Sustainability in ASEAN Community, 11-13 June 2014, 2014
13. F. Gunst, R. Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments. (ed.), 284-286. 2012.
14. C. Hao, L. and D. Yu, W. 2009. Evaluation of thermal protective performance of basalt fiber nonwoven fabrics. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry 100: 551-555.
15. Technobasalt. Basalt Fiber[Online]. Available from: <http://technobasalt.com/> [22 May 2017]
16. Singha, K. 2012. A short review on basalt fiber. International Journal of Textile Science 1: 19-28.
17. Zheng, R., Wang, S.R., Nie, H.W., and Wen, T.L. 2004. SiO₂-CaO-B₂O₃-Al₂O₃ ceramic glaze as sealant for planar ITSOFC. Journal of Power Sources 128: 165-172.
18. Bandyopadhyay, A.K. and Isard, J.O. 1977. Electrical conductivity of barium borate glasses containing mixed transition metal oxides. Journal of Physics D: Applied Physics 10: L99.
19. Melling, P.J., Vempati, C.S., Allnatt, A.R., and Jacobs, P.W.M. (1981). Tracer Diffusion In And Electrical Conductivity Of A Natural Volcanic Glass: Rhyolite.
20. Vogel, W., Kreidl, N.J., and Lense, E. (1985). Chemistry of glass. Columbus, Ohio :: American Ceramic Society.
21. Alexander, F., Arun, K.V., David, A.E., Thomas, P.S., and Dolun, O. Improved Composition-Property Relations in Silicate Glasses, Part I: Viscosity. (ed.), Melt Chemistry, Relaxation, and Solidification Kinetics of Glasses, 2012.
22. Touloukian, Y.S. (2018). Thermophysical properties of high temperature solid materials
23. Lipatov, Y.V., et al. 2014. Crystallization of zirconia doped basalt fibers. Thermochimica Acta 575: 238-243.

24. Wang, W., Weng, D., and Wu, X.-d. 2011. Preparation and thermal stability of zirconia-doped mullite fibers via sol-gel method. Progress in Natural Science: Materials International 21: 117-121.
25. Karamanov, A., Ergul, S., Akyildiz, M., and Pelino, M. 2008. Sinter-crystallization of a glass obtained from basaltic tuffs. Journal of Non-Crystalline Solids 354: 290-295.
26. Karamanov, A. and Pelino, M. 2001. Crystallization phenomena in iron-rich glasses. Journal of Non-Crystalline Solids 281: 139-151.
27. Cook, G.B., Cooper, R.F., and Wu, T. 1990. Chemical diffusion and crystalline nucleation during oxidation of ferrous iron-bearing magnesium aluminosilicate glass. Journal of Non-Crystalline Solids 120: 207-222.
28. Cooper, R.F., Fanselow, J.B., and Poker, D.B. 1996. The mechanism of oxidation of a basaltic glass: Chemical diffusion of network-modifying cations. Geochimica et Cosmochimica Acta 60: 3253-3265.
29. Gutnikov, S.I., Pavlov, Y.V., and Zhukovskaya, E.S. 2018. Influence of vibration on basalt fiber crystallization at high temperature. Journal of Non-Crystalline Solids
30. Lyubimov, D.V., Lyubimova, T.P., Meradji, S., and Roux, B. 1997. Vibrational control of crystal growth from liquid phase. Journal of Crystal Growth 180: 648-659.
31. Avetissov, I.C., et al. 2011. Simulation and crystal growth of CdTe by axial vibration control technique in Bridgman configuration. Journal of Crystal Growth 318: 528-532.
32. Wallenberger, F.T. and Smrček, A. 2010. The Liquidus Temperature; Its Critical Role in Glass Manufacturing. International Journal of Applied Glass Science 1: 151-163.
33. Mohd Fadzil, S., Hrma, P., Schweiger, M.J., and Riley, B.J. 2015. Liquidus temperature and chemical durability of selected glasses to immobilize rare earth oxides waste. Journal of Nuclear Materials 465: 657-663.

34. Bellini, F.E., L., L.M., and D., Z.E. 2010. DSC Method for Determining the Liquidus Temperature of Glass-Forming Systems. Journal of the American Ceramic Society 93: 3757-3763.
35. Young, P.H., Dollimore, D., and Schall, C.A. 2000. Thermal Analysis of Solid-Solid Interactions in Binary Mixtures of Alkylcyclohexanes Using DSC. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry 62: 163-171.
36. Verdonck, E., Schaap, K., and Thomas, L.C. 1999. A discussion of the principles and applications of Modulated Temperature DSC (MTDSC). International Journal of Pharmaceutics 192: 3-20.
37. Charsley, E.L., Laye, P.G., Palakollu, V., Rooney, J.J., and Joseph, B. 2006. DSC studies on organic melting point temperature standards. Thermochimica Acta 446: 29-32.
38. Veit, U., Houet, Y., Laurent, D., and Rüssel, C. 2015. Liquidus temperatures of calcium magnesium aluminosilicate glass-forming compositions determined via gradient furnace and from the melting peak by differential thermal analysis. Thermochimica Acta 618: 1-5.
39. Tian, T.L., Zhang, Y.Z., Yang, A.M., and Zhang, Z.Q. 2017. Crystallization Behavior and Damage Mechanism of Mineral Wool Fibers When Heated. Transactions of the Indian Institute of Metals 70: 1601-1606.
40. Karlsson, K.H., Backman, R., and Hupa, L. Models for liquidus temperatures. in Proceedings of the Sixth European Glass Society Conference, 2002
41. French, W.J. and Cameron, E.P. 1981. Calculation of the temperature of crystallization of silicates from basaltic melts. Mineralogical Magazine 44: 19-26.
42. Rao, Q., Piepel, G.F., Hrma, P., and Crum, J.V. 1997. Liquidus temperatures of HLW glasses with zirconium-containing primary crystalline phases. Journal of Non-Crystalline Solids 220: 17-29.
43. Hanni, J.B., et al. 2005. Liquidus temperature measurements for modeling oxide glass systems relevant to nuclear waste vitrification. Journal of Materials Research 20: 3346-3357.

44. ฉลอง สีแก้วสีว. ขั้นตอนการวิเคราะห์ Multiple Linear Regression[ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://sites.google.com/site/mystatistics01/regression-correlation-analysis/multiple-linear-regression-step>
45. Gryc, K., et al. (2014). Determination of solidus and liquidus temperatures for S34MnV steel grade by thermal analysis and calculations.





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก

ตารางที่ ก-1 แสดงค่า 2θ , Intensity และ hkl ของ แอลไบต์ ซึ่งเป็นข้อมูลมาตรฐานจาก 2003 JCPDS-International Centre for Diffraction Data (PCPDFWIN) หมายเลข JCPDS 01-089-6426

Pattern : 01-089-6426		Radiation = 1.540600					Quality : Calculated				
Na(AlSi ₃ O ₈)		2th	i	h	k	l	2th	i	h	k	l
Sodium Aluminum Silicate Albite (heat-treated)		13.896	142	0	0	1	52.840	40	-3	-1	4
		*13.896	142	-1	1	0	*52.840	40	-4	-4	2
		15.062	49	-1	-1	1	53.048	46	-2	6	2
		15.812	43	-1	1	1	*53.048	46	2	-4	2
		19.041	3	0	-2	1	53.249	27	0	6	2
		20.302	2	0	2	1	*53.249	27	0	4	3
		22.044	723	-2	0	1	53.624	14	-4	-4	4
		23.046	128	1	-1	1	*53.843	8	-3	1	4
		23.952	291	1	1	1	54.119	7	-1	1	4
		24.167	344	-1	3	0	*54.119	7	2	-6	1
		24.258	330	1	3	0	54.221	11	-3	-5	3
		24.380	155	-1	-3	1	*54.453	28	-4	2	4
		*24.380	155	2	0	0	54.697	15	-4	4	2
		25.507	99	-1	-1	2	54.951	12	-1	-7	2
		25.709	40	-2	-2	1	*54.951	12	-1	5	3
		26.448	119	-1	1	2	55.266	25	2	4	2
		27.777	548	-2	0	2	55.729	3	1	3	3
		28.002	999	0	4	0	55.944	4	2	6	1
		*28.002	999	0	0	2	*55.944	4	-3	-3	4
		28.143	413	-2	2	0	56.152	6	-1	-3	4
		28.249	372	2	2	0	*56.152	6	-4	-4	3
		30.025	165	1	-3	1	56.312	7	-1	7	1
		30.392	115	-2	-2	2	*56.312	7	-2	-6	3
		30.511	209	0	-4	1	56.790	1	-5	-1	2
		*30.511	209	0	-2	2	57.232	1	-5	1	2
		31.346	115	1	3	1	*57.232	1	3	-1	2
		31.634	37	-1	-3	2	57.380	1	-4	0	4
		31.935	6	-2	2	2	*57.380	1	-4	0	4
		32.144	8	0	4	1	57.753	17	0	8	0
		*32.144	8	0	2	2	*57.753	17	3	1	2
		33.328	1	2	0	1	57.833	24	-3	5	3
		33.687	5	-3	-1	1	*57.833	24	0	4	4
		33.917	64	-1	3	2	58.027	20	3	-5	1
		34.001	39	-3	1	1	58.191	10	-4	4	0
		35.232	142	-2	-4	1	58.409	18	-4	-2	4
		35.448	33	-3	-1	2	*58.409	18	4	4	0
		35.767	17	1	-1	2	58.579	13	4	0	1
		35.852	23	2	-2	1	58.727	19	-5	-1	1
		36.110	12	-3	1	2	*58.727	19	0	-8	1
		36.510	107	1	1	2	58.844	31	0	-2	4
		*36.510	107	-2	4	1	*58.844	31	-5	1	1
		36.655	66	2	2	1	58.968	16	-4	4	3
		37.088	39	-1	-5	1	59.123	7	-1	3	4
		37.253	25	-1	5	0	59.333	9	2	0	3
		37.368	26	1	5	0	*59.488	28	3	5	1
		37.368	26	1	5	0	*59.488	28	-5	1	3
		37.533	40	2	4	0	60.266	14	-4	2	4
		37.661	41	-3	1	0	*60.266	14	-5	-3	2
		37.723	34	3	1	0	60.499	12	2	2	2
		38.362	2	-2	0	3	*60.499	12	-3	-7	1
		38.714	17	-1	-1	3	60.678	9	-2	6	3
		*38.714	17	-1	5	1	*60.678	9	0	8	1
		39.030	61	-3	-3	1	60.808	7	0	2	4
		39.647	13	-1	1	3	*60.808	7	4	2	1
		39.854	22	-3	3	1	61.023	11	-3	-7	2
		40.263	2	-3	-3	2	*61.023	11	1	-7	2
		40.472	9	1	-3	2	61.345	12	-2	4	4
		41.043	15	-2	4	1	61.524	8	-5	3	2
		41.138	35	1	-5	1	61.736	22	-2	-8	1
		41.279	26	0	4	2	62.022	29	2	2	3
		41.903	9	-2	2	3	*62.022	29	-5	-3	3
		42.027	7	-3	3	2	62.173	19	3	3	2
		42.098	5	-1	-5	2	62.404	14	-5	-3	1
		42.470	75	1	3	2	*62.404	14	2	-6	2
		*42.470	75	0	6	0	62.770	3	-3	-5	4
		42.559	46	0	0	3	62.873	7	-5	3	1
		42.819	36	1	5	1	*62.873	7	-1	-5	4
		*42.819	36	-1	-3	3	63.247	10	-4	-4	1
		42.944	29	3	3	0	*63.247	10	-4	-6	2
		43.346	57	2	-4	1	63.525	47	0	-8	2
		44.065	2	0	-2	3	*63.525	47	-2	8	0
		44.712	11	2	4	1	63.749	54	-3	7	0
		44.962	12	-4	0	2	*63.749	54	2	8	0
		45.085	9	-1	5	2	63.840	35	0	6	3
		45.249	14	-4	0	1	63.955	35	3	7	0
		45.407	11	2	0	2	*63.955	35	-5	3	3
		45.510	12	-1	3	3	64.204	10	1	5	3
		45.793	30	0	6	1	*64.330	31	-4	6	1
		45.867	26	0	2	3	64.330	31	5	1	0
		*45.867	26	3	-1	1	64.465	17	1	7	2
		46.305	8	3	1	1	64.810	22	-4	6	2
		*46.305	8	-3	-3	3	65.107	13	-4	-6	3
		46.461	5	-2	-4	3	65.107	13	-3	-7	3
		46.768	11	-4	-2	2	65.408	46	2	6	2
		47.097	22	2	-2	2	*65.408	46	-5	1	4
		47.786	61	-4	2	1	65.551	29	4	-4	1
		*47.786	61	-4	2	2	66.067	11	-2	-6	4
		48.313	47	2	2	2	66.223	20	1	1	4
		48.451	36	-3	-5	1	66.699	10	4	4	1
		48.742	3	-3	3	3	*66.699	10	-4	4	4
		49.263	70	-4	0	3					
		*49.263	70	1	-5	3					
		49.501	48	-2	6	0					
		49.607	35	-3	5	1					
		49.699	36	2	6	0					
		*49.699	36	-2	4	3					
		50.063	114	0	-4	3					
		*50.063	114	4	0	0					
		50.747	52	-4	-2	3					
		*50.747	52	1	1	3					
		51.047	7	3	3	1					
		51.325	119	-2	0	4					
		51.590	16	-1	7	0					
		51.702	10	1	7	0					
		*51.702	10	-3	5	2					
		52.145	15	-4	2	0					
		*52.145	15	1	5	2					
		52.272	23	4	2	0					
		52.401	26	-2	-2	4					
Radiation : CuKα1		Filter : Not specified									
Lambda : 1.54060		d-sp : Calculated spacings									
SS/FOM : F30=108(0.0071,39)											

ตารางที่ ก-2 แสดงค่า 2 θ , Intensity และ hkl ของ ไดออปไซด์ aluminum ซึ่งเป็นข้อมูลมาตรฐาน จาก 2003 JCPDS-International Centre for Diffraction Data (PCPDFWIN) หมายเลข JCPDS 01-080-0409

Pattern : 01-080-0409		Radiation = 1.540600					Quality : Calculated				
Ca(Mg _{0.5} Al _{0.5})(Al _{0.5} Si _{1.5} O ₆)		2th	i	h	k	l	2th	i	h	k	l
Calcium Magnesium Aluminum Silicate Diopside aluminian, syn		13.888	1	1	1	0	68.865	11	-7	1	1
		19.132	15	2	0	0	70.285	13	0	4	3
		20.233	43	-1	1	1	71.294	58	-7	1	2
		*20.233	43	0	2	0	71.491	39	-2	0	4
		24.432	34	1	1	1	*71.491	39	3	1	3
		26.863	53	0	2	1	71.833	42	-5	3	3
		27.986	215	2	2	0	71.920	51	6	2	1
		30.108	999	-2	2	1	72.062	31	7	1	0
		30.649	287	3	1	0	72.868	4	-6	4	1
		31.082	392	-3	1	1	*72.868	4	-5	5	1
		32.074	15	1	3	0	73.121	40	-3	1	4
		35.395	665	-1	3	1	73.266	34	-1	1	4
		*35.395	665	0	0	2	74.600	15	-4	0	4
		35.495	397	-1	1	2	74.939	74	0	0	4
		36.037	441	2	2	1	*74.939	74	0	6	2
		38.090	18	1	3	1	75.161	41	-2	2	4
		38.824	6	4	0	0	*75.161	41	6	4	0
		39.487	181	3	1	1	76.078	3	-6	4	2
		40.736	97	1	1	2	76.281	14	-7	3	1
		41.108	116	0	2	2	76.435	21	4	4	2
		*41.108	116	0	4	0	*76.435	21	-4	6	1
		42.532	110	3	3	0	76.684	11	1	7	0
		42.860	163	-3	3	1	76.971	3	-5	5	2
		43.314	95	-4	2	1	77.256	67	3	5	2
		44.162	13	4	2	0	78.237	8	-4	2	4
		45.010	300	-4	0	2	78.567	20	-1	7	1
		*45.010	300	0	4	1	*78.567	20	-7	3	2
		45.291	88	2	0	2	78.811	11	3	3	3
		45.737	6	2	4	0	79.045	10	5	3	2
		46.310	94	-1	3	2	79.136	10	-7	1	3
		47.159	5	-2	4	1	79.363	6	7	3	0
		48.415	3	-5	1	1	79.919	1	1	1	4
		49.582	14	3	3	1	80.212	22	1	7	1
		49.802	9	-4	2	2	80.390	14	-3	3	4
		50.074	27	2	2	2	*80.390	14	-1	3	4
		50.254	69	5	1	0	80.619	8	7	1	1
		50.451	36	-3	3	2	80.952	3	-8	0	2
		50.631	31	1	3	2	81.234	5	5	5	1
		51.426	2	2	4	1	*81.234	5	-4	6	2
		52.068	5	4	2	1	81.479	3	6	0	2
		53.091	109	1	5	0	*81.479	3	2	6	2
		53.440	27	-5	1	2	81.816	7	1	5	3
		53.785	6	3	1	2	82.404	1	4	2	3
		55.148	77	-3	1	3	83.035	12	-8	2	1
		55.364	76	-1	5	1	*83.035	12	3	7	0
		*55.364	76	0	4	2	83.321	20	8	0	0
		56.504	147	-2	2	3	*83.321	20	-3	7	1
		57.295	140	-5	3	1	84.129	35	-6	0	4
		*57.295	140	1	5	1	*84.592	17	-6	4	3
		57.842	56	4	4	0	84.592	17	2	0	4
		58.503	5	5	1	1	85.005	9	6	2	2
		*58.503	5	0	2	3	85.772	8	-1	7	2
		58.938	25	5	3	0	86.275	9	-7	3	3
		59.164	14	1	1	3	*86.275	9	-5	5	3
		59.807	30	6	0	0	86.623	9	-5	3	4
		60.654	63	3	5	0	*86.623	9	-2	6	3
		60.828	90	-6	0	2	86.871	6	8	2	0
		*60.828	90	-3	5	1	87.731	1	-6	2	4
		61.225	77	4	0	2	*87.731	1	7	3	1
		61.336	52	-6	2	1	88.229	19	3	7	1
		61.716	141	-1	3	3	*88.229	19	2	2	4
		61.910	87	-4	2	3	88.349	9	0	6	3
		62.592	2	-4	4	2	88.925	3	-4	4	4
		62.826	17	2	4	2	*88.925	3	1	7	2
		63.382	5	-3	3	3	89.204	2	0	4	4
		63.598	36	0	6	0	89.320	3	5	1	3
		*63.598	36	-1	5	2	*89.320	3	0	8	0
		63.819	21	6	2	0					
		64.203	4	-5	1	3					
		64.557	14	4	4	1					
		64.804	19	-6	2	2					
		65.186	16	4	2	2					
		66.471	168	5	3	1					
		*66.471	168	0	6	1					
		67.050	112	-3	5	2					
		*67.050	112	2	6	0					
		67.201	83	1	5	2					
		67.508	57	2	2	3					
		68.195	2	-2	6	1					
		68.483	11	-2	4	3					
Radiation : CuK α 1		Filter : Not specified									
Lambda : 1.54060		d-sp : Calculated spacings									
SS/FOM : F30=253(0.0032,37)											

ตารางที่ ก-3 แสดงค่า 2 θ , Intensity และ hkl ของ Leucite ซึ่งเป็นข้อมูลมาตรฐานจาก 2003 JCPDS-International Centre for Diffraction Data (PCPDFWIN) หมายเลข JCPDS 01-085-1419

Pattern : 01-085-1419		Radiation = 1.540600					Quality : Calculated				
K(AlSi ₂ O ₆)		2th	i	h	k	l	2th	i	h	k	l
Potassium Aluminum Silicate Leucite low		9.379	71	1	0	1	56.875	10	4	4	6
		13.518	23	2	0	0	57.086	11	8	1	1
		16.182	141	1	1	2	57.535	3	6	4	4
		16.478	434	1	2	1	57.817	18	3	5	6
		18.821	67	2	0	2	*57.817	18	2	2	8
		19.162	12	2	2	0	58.059	37	8	2	0
		20.756	16	1	0	3	58.177	20	3	6	5
		21.373	2	3	0	1	58.770	23	6	0	6
		23.245	2	2	2	2	*58.770	23	3	1	8
		24.852	79	1	2	3	59.255	13	5	0	7
		25.180	81	3	1	2	59.783	7	8	2	2
		25.375	115	3	2	1	59.911	4	6	6	0
		26.242	684	0	0	4	60.315	22	7	3	4
		27.229	999	4	0	0	60.538	25	7	4	3
		27.984	8	1	1	4	*60.538	25	6	2	6
		28.395	27	3	0	3	61.085	8	5	2	7
		28.858	43	1	4	1	61.515	17	4	0	8
		29.631	30	2	0	4	62.502	35	7	5	2
		30.297	34	4	0	2	63.020	19	8	0	4
		30.516	270	4	2	0	63.307	8	4	2	8
		31.571	345	3	2	3	63.517	10	4	8	0
		31.835	227	3	3	2	63.666	13	1	2	9
		32.698	2	2	2	4	64.123	3	3	8	3
		33.309	14	2	4	2	64.369	9	9	0	1
		33.692	1	1	0	5	64.653	5	1	6	7
		34.139	85	3	1	4	64.787	10	8	2	4
		34.484	21	1	4	3	65.051	12	7	1	6
		34.874	2	3	4	1	65.942	7	1	5	8
		36.455	11	2	1	5	66.118	16	7	6	1
		37.424	9	5	1	2	66.397	13	5	4	7
		37.560	26	5	2	1	66.530	8	6	6	4
		38.176	232	4	0	4	67.158	5	1	8	5
		38.888	53	4	4	0	*67.158	5	2	3	9
		39.047	36	3	0	5	67.392	5	5	7	4
		39.442	20	3	3	4	67.602	11	9	0	3
		39.747	17	5	0	3	67.842	12	8	5	1
		40.675	3	2	4	4	68.118	17	6	3	7
		41.183	2	4	4	2	68.506	49	3	7	6
		41.503	23	3	2	5	*68.506	49	4	4	8
		42.235	54	2	0	6	68.870	5	4	1	9
		42.375	112	3	5	2	69.309	20	7	6	3
		42.498	65	6	1	1	69.457	12	3	9	2
		43.700	28	2	6	0	69.819	9	7	0	7
		43.845	19	1	4	5	70.002	33	8	4	4
		44.204	11	1	5	4	*70.002	33	1	1	10
		44.798	17	5	4	1	70.220	17	6	0	8
		45.666	18	1	3	6	70.526	2	8	3	5
		45.797	15	6	2	2	70.845	3	2	0	10
		46.704	17	1	6	3	70.997	17	5	8	3
		47.008	19	3	6	1	*70.997	17	8	0	6
		47.357	10	1	0	7					
		47.522	36	4	4	4					
		48.255	5	3	4	5					
		48.907	28	4	5	3					
		*48.907	28	4	0	6					
		49.479	19	1	2	7					
		49.639	12	6	0	4					
		49.952	34	3	3	6					
		50.219	23	4	6	0					
		50.349	18	5	2	5					
		50.923	39	3	6	3					
		*50.923	39	2	4	6					
		51.102	43	7	1	2					
		51.208	31	7	2	1					
		51.536	5	3	0	7					
		51.691	9	2	6	4					
		52.114	1	4	6	2					
		52.939	17	7	0	3					
		53.536	57	3	2	7					
		54.003	23	1	5	6					
		*54.003	23	0	0	8					
		54.359	2	1	6	5					
		54.903	43	7	2	3					
		55.073	120	3	7	2					
		55.174	63	5	6	1					
		55.485	23	1	4	7					
		55.942	11	2	0	8					
		56.169	21	8	0	0					
		56.289	16	4	5	5					
		56.589	30	7	1	4					
Radiation : CuK α 1		Filter : Not specified									
Lambda : 1.54060		d-sp : Calculated spacings									
SS/FOM : F30=1000(0.0000,30)											

ตารางที่ ก-4 แสดงค่า 2θ , Intensity และ hkl ของ Hematite ซึ่งเป็นข้อมูลมาตรฐานจาก 2003 JCPDS-International Centre for Diffraction Data (PCPDFWIN) หมายเลข JCPDS 00-002-0915

Pattern : 00-002-0915		Radiation = 1.540598		Quality : Deleted		
Fe ₂ O ₃		2th	i	h	k	l
Iron Oxide		24.099	80	0	1	2
Hematite, syn		33.280	100	1	0	4
		35.744	90	1	1	0
		40.991	60	1	1	3
		42.824	10	2	0	2
		43.693	10			
		49.498	80	0	2	4
		54.233	90	1	1	6
		57.955	60	0	1	8
		62.728	80	2	1	4
		64.179	80	3	0	0
		69.583	30	2	0	8
		72.032	60	1	0	10
		72.675	40	1	1	9
		75.374	60	2	1	7
		78.306	40	3	0	6
		79.079	40	2	2	3
		80.678	50	3	1	2
		83.219	60	0	2	10
		85.017	50	1	3	4
		88.898	50	2	2	6
		94.381	50	2	1	10
		95.577	20	1	1	12
		102.170	40	2	3	2
		106.719	50	3	2	4
		108.356	50	4	1	0
		110.063	40	2	3	5
		115.662	50	1	3	10
Lattice : Rhombohedral		Mol. weight = 159.69				
S.G. : R-3c (167)		Volume [CD] = 300.56				
a = 5.02800	Z = 2	Dx = 1.765				
c = 13.72800		Dm = 5.260				
<p>Deleted and rejected by: Delete: similar to 1-1053, (Rinn, August 17, 1953). Melting point: 1350 Color: Red to steel gray Optical data: A=2.78, B=3.01, Sign=- Unit cell: Rhombohedral cell: a=5.419, α=55.28. Data collection flag: Ambient.</p>						
Harrington., Am. J. Sci., volume 13, page 472 (1927)						
Radiation : MoK α 1		Filter : Not specified				
Lambda : 0.70900		d-sp : Not given				
SS/FOM : F27= 9(0.0680,46)						

ตารางที่ ก-5 แสดงค่า 2θ , Intensity และ hkl ของ Nepheline ซึ่งเป็นข้อมูลมาตรฐานจาก 2003 JCPDS-International Centre for Diffraction Data (PCPDFWIN) หมายเลข JCPDS 01-079-0991

Pattern : 01-079-0991		Radiation = 1.540600					Quality : Calculated				
Na _{7.11} (Al _{7.2} Si _{8.8} O ₃₂)		2th	i	h	k	l	2th	i	h	k	l
Sodium Aluminum Silicate Nepheline, syn		10.249	176	1	0	0	71.210	4	2	0	6
		14.764	7	1	0	1	71.443	18	4	0	5
		17.800	206	1	1	0	71.708	11	1	6	0
		20.582	401	2	0	0	71.973	77	5	2	2
		20.760	116	1	1	1	72.734	2	6	1	1
		21.288	741	0	0	2	73.723	4	2	4	4
		23.203	999	2	0	1	74.084	12	1	2	6
		23.679	11	1	0	2	74.313	85	3	2	5
		27.339	803	1	2	0	75.162	34	3	4	3
		27.884	26	1	1	2	75.781	8	6	1	2
		29.396	161	2	1	1	75.977	27	3	0	6
		29.779	997	2	0	2	76.203	15	1	4	5
		31.086	427	3	0	0	76.560	11	1	5	4
		32.930	9	3	0	1	77.046	4	2	5	3
		33.847	16	1	0	3	77.402	38	3	5	0
		34.908	257	1	2	2	78.401	23	5	3	1
		36.049	139	2	2	0	78.787	23	2	2	6
		37.002	23	1	1	3	79.718	28	3	1	6
		37.574	100	3	1	0	79.942	68	5	0	5
		37.678	83	2	2	1	80.197	36	6	2	0
		37.986	10	3	0	2	80.453	6	4	4	2
		38.496	530	2	0	3	80.773	5	6	1	3
		39.149	303	1	3	1	81.221	16	6	2	1
		41.867	32	4	0	0	81.221	16	6	0	4
		42.244	3	2	2	2	81.379	82	7	0	2
		42.711	93	2	1	3	81.794	13	3	3	5
		43.358	128	4	0	1	82.144	7	3	4	4
		*43.358	128	0	0	4	82.494	4	4	0	6
		43.587	135	1	3	2	82.716	13	4	2	5
		44.674	26	1	0	4	83.320	1	1	1	7
		45.342	10	3	0	3	83.986	8	5	2	4
		45.828	64	2	3	0	84.144	14	6	2	2
		47.175	110	3	2	1	84.241	11	2	0	7
		47.432	35	4	0	2	84.810	2	1	7	0
		48.325	24	1	4	0	85.379	36	4	4	3
		48.451	39	2	0	4	85.474	24	5	1	5
		49.080	1	2	2	3	86.296	34	7	0	3
		49.620	29	4	1	1	86.991	4	1	2	7
		50.279	13	3	1	3	87.653	3	1	6	4
		51.054	59	2	3	2	88.474	2	5	4	0
		52.020	24	1	2	4	88.725	9	1	7	2
		53.052	28	5	0	0	89.041	6	2	6	3
		53.367	34	1	4	2	89.451	2	5	4	1
		53.760	41	4	0	3					
		54.266	66	5	0	1					
		*54.266	66	3	0	4					
		55.308	16	3	3	0					
		56.412	60	4	2	0					
		57.091	133	3	2	3					
		57.578	28	4	2	1					
		57.802	57	5	0	2					
		58.285	14	1	1	5					
		58.692	9	3	1	4					
		59.243	126	1	4	3					
		59.354	204	2	0	5					
		59.646	62	5	1	0					
		59.938	15	3	3	2					
		60.772	27	5	1	1					
		60.989	36	4	2	2					
		61.851	6	4	0	4					
		62.492	14	2	1	5					
		63.413	81	5	0	3					
		64.080	37	5	1	2					
		64.535	4	3	0	5					
		64.814	8	6	0	0					
		64.919	9	3	2	4					
		65.440	123	3	3	3					
		65.889	5	6	0	1					
		66.441	4	4	2	3					
		66.887	10	4	3	1					
		67.298	41	0	0	6					
		67.537	26	2	2	5					
		67.809	187	5	2	0					
		68.286	6	1	0	6					
		68.523	69	1	3	5					
		69.064	5	6	0	2					
		69.401	12	5	1	3					
		70.040	14	4	3	2					
		70.241	20	1	1	6					
		70.843	1	5	0	4					
Lattice : Hexagonal		Mol. weight = 1116.86									
S.G. : P63 (173)		Volume [CD] = 716.30									
a = 9.95800		Dx = 2.589									
c = 8.34100		l/cor = 0.80									
Z = 1											
ICSD collection code: 065958											
Temperature factor: ATF											
Remarks from ICSD/CSD: REM TWI.											
Data collection flag: Ambient.											
Hippler, B., Boehm, H., Z. Kristallogr., volume 187, page 39 (1989) Calculated from ICSD using POWD-12++ (1997)											
Radiation : CuKα1		Filter : Not specified									
Lambda : 1.54060		d-sp : Calculated spacings									
SS/FOM : F30=638(0.0015,31)											

ตารางที่ ก-6 แสดงค่า 2θ , Intensity และ hkl ของ Sodium Calcium Aluminum Silicate ซึ่ง
เป็นข้อมูลมาตรฐานจาก 2003 JCPDS-International Centre for Diffraction Data (PCPDFWIN)
หมายเลข JCPDS 01-076-0479

Pattern : 01-076-0479		Radiation = 1.540600					Quality : Alternate				
NaCaAlSi ₂ O ₇		2th	i	h	k	l	2th	i	h	k	l
Sodium Calcium Aluminum Silicate		16.404	54	1	1	0	87.091	36	5	1	3
		17.562	204	0	0	1	*87.091	36	3	1	4
		21.086	41	1	0	1	87.850	2	6	3	1
		23.279	6	2	0	0					
		24.121	155	1	1	1					
		26.073	104	2	1	0					
		29.310	192	2	0	1					
		31.611	999	2	1	1					
		33.157	47	2	2	0					
		35.554	30	0	0	2					
		37.205	154	3	1	0					
		37.513	88	1	0	2					
		37.761	100	2	2	1					
		39.388	41	1	1	2					
		39.626	97	3	0	1					
		41.421	17	3	1	1					
		42.657	1	3	2	0					
		42.932	4	2	0	2					
		44.618	70	2	1	2					
		46.464	22	3	2	1					
		47.596	71	4	0	0					
		49.156	33	4	1	0					
		49.402	25	2	2	2					
		50.680	80	3	3	0					
		51.115	4	4	0	1					
		52.407	207	3	1	2					
		52.598	133	4	1	1					
		53.633	58	4	2	0					
		54.052	19	3	3	1					
		54.512	7	0	0	3					
		55.932	8	1	0	3					
		56.702	23	3	2	2					
		56.883	22	4	2	1					
		57.328	18	1	1	3					
		60.058	7	2	0	3					
		60.581	1	4	3	0					
		60.795	3	4	0	2					
		61.395	57	2	1	3					
		61.912	2	5	1	0					
		62.123	5	4	1	2					
		63.434	11	3	3	2					
		63.604	9	5	0	1					
		64.898	17	5	1	1					
		65.310	34	2	2	3					
		65.809	12	5	2	0					
		66.014	19	4	2	2					
		66.586	14	3	0	3					
		67.852	23	3	1	3					
		68.705	88	5	2	1					
		69.591	32	4	4	0					
		71.582	11	3	2	3					
		72.061	6	5	3	0					
		72.257	13	4	3	2					
		72.416	17	4	4	1					
		73.477	6	5	1	2					
		74.496	29	6	0	0					
		75.269	11	4	0	3					
		*75.269	11	0	0	4					
		75.703	6	6	1	0					
		76.435	37	4	1	3					
		*76.435	37	1	0	4					
		77.094	8	5	2	2					
		77.632	9	3	3	3					
		*77.632	9	1	1	4					
		78.442	12	6	1	1					
		79.286	1	6	2	0					
		80.010	6	4	2	3					
		*80.010	6	2	0	4					
		80.471	1	5	4	0					
		80.660	8	4	4	2					
		81.227	1	2	1	4					
		81.993	14	6	2	1					
		83.016	9	5	3	2					
		83.169	18	5	4	1					
		84.752	9	2	2	4					
		85.173	3	6	3	0					
		85.361	15	6	0	2					
		85.922	20	4	3	3					
		*85.922	20	3	0	4					
		86.530	7	6	1	2					
Lattice : Tetragonal		Mol. weight = 258.22									
S.G. : P-421m (113)		Volume [CD] = 294.22									
a = 7.63600		Dx = 2.915									
c = 5.04600		l/cor = 2.12									
Z = 2											
ICSD collection code : 034063											
Temperature factor : ITF											
Data collection flag : Ambient.											
Schichl, H., Raaz, F., Anz. Oesterr. Akad. Wiss., Math.-Naturwiss. Kl., volume 105, page 361 (1968)											
Calculated from ICSD using POWD-12++ (1997)											
Radiation : CuK α 1		Filter : Not specified									
Lambda : 1.54060		d-sp : Calculated spacings									
SS/FOM : F30=1000(0.0001,31)											

ตารางที่ ก-7 แสดงค่า 2θ , Intensity และ hkl ของ Cristobalite ซึ่งเป็นข้อมูลมาตรฐานจาก 2003 JCPDS-International Centre for Diffraction Data (PCPDFWIN) หมายเลข JCPDS 01-089-3607

Pattern : 01-089-3607		Radiation = 1.540600		Quality : Alternate			
SiO ₂		2th	i	h	k	l	
Silicon Oxide		17.727	999	1	0	1	
Cristobalite β (high)		*17.727	999	1	1	0	
		21.755	173	1	1	1	
		25.172	260	2	0	0	
		28.201	164	1	0	2	
		*28.201	164	2	1	0	
		30.957	69	2	1	1	
		*30.957	69	1	1	2	
		35.898	25	2	2	0	
		*35.898	25	2	0	2	
		38.157	72	2	2	1	
		*38.157	72	2	1	2	
		40.308	64	3	1	0	
		*40.308	64	1	0	3	
		42.367	116	3	1	1	
		*42.367	116	1	1	3	
		44.349	16	2	2	2	
		46.262	148	3	0	2	
		*46.262	148	2	0	3	
		48.117	40	3	2	1	
		*48.117	40	3	1	2	
		51.674	12	0	0	4	
		*51.674	12	4	0	0	
		53.388	81	3	2	2	
		*53.388	81	2	2	3	
		55.065	66	4	1	1	
		*55.065	66	3	3	0	
		56.708	59	3	1	3	
		*56.708	59	3	3	1	
		58.321	21	4	0	2	
		*58.321	21	4	2	0	
		59.906	40	2	1	4	
		*59.906	40	4	2	1	
		61.466	9	3	2	3	
		*61.466	9	3	3	2	
		64.520	14	4	2	2	
		*64.520	14	2	2	4	
		66.017	11	4	0	3	
		*66.017	11	3	0	4	
		67.498	52	4	3	1	
		*67.498	52	1	0	5	
		68.963	4	3	3	3	
		*68.963	4	5	1	1	
		71.851	22	5	2	0	
		*71.851	22	4	2	3	
		73.277	18	2	1	5	
		*73.277	18	5	2	1	
		76.098	2	4	0	4	
		*76.098	2	4	4	0	
		77.495	15	4	4	1	
		*77.495	15	4	1	4	
		78.885	16	3	3	4	
		*78.885	16	4	3	3	
		80.268	4	5	3	1	
		*80.268	4	5	1	3	
		81.646	6	4	4	2	
		*81.646	6	4	2	4	
		83.018	2	6	0	1	
		*83.018	2	1	0	6	
		84.386	24	6	1	1	
		*84.386	24	1	1	6	
		87.114	3	6	2	0	
		*87.114	3	6	0	2	
		88.476	17	6	2	1	
		*88.476	17	6	1	2	
		89.837	6	5	1	4	
		*89.837	6	5	4	1	
Lattice : Tetragonal S.G. : P41212 (92) a = 7.07000 c = 7.07000 Z = 4		Mol. weight = 60.08 Volume [CD] = 353.39 Dx = 1.129 l/lor = 3.35					
ICSD collection code: 044269 Hypothetical structure: Structure calculated theoretically. Remarks from ICSD/CSD: REM M 0.188 eV/moleicule above quartz-structure. Remarks from ICSD/CSD: REM M Measured cell: 4.9570, 6.8903. Test from ICSD: No R value given. Test from ICSD: At least one TF missing. Data collection flag: Ambient.							
Keskar, N.R., Chelikowsky, J.R., Phys. Rev. B: Condens. Matter, volume 46, page 1 (1992) Calculated from ICSD using POWD-12++							
Radiation : CuK α 1 Lambda : 1.54060 SS/FOM : F30=1000(0.0000,31)		Filter : Not specified d-sp : Calculated spacings					

ภาคผนวก ข

การคำนวณน้ำหนักขององค์ประกอบแก้วฐานบะซอลต์ ด้วยโปรแกรม Minitab® 17.1.0



Minitab® 17

Extreme Vertices Design

Components: 7 Design points: 541

Process variables: 0 Design degree: 2

Mixture total: 1.00000

Number of Boundaries for Each Dimension

Point Type	1	2	3	4	5	6	0
Dimension	0	1	2	3	4	5	6
Number	104	332	414	255	83	14	1

Number of Design Points for Each Type

Point Type	1	2	3	4	5	6	7	0	-1
Distinct	104	332	0	0	0	0	0	1	104
Replicates	1	1	0	0	0	0	0	1	1
Total number	104	332	0	0	0	0	0	1	104

Bounds of Mixture Components

Comp	Amount		Proportion		Pseudocomponent	
	Lower	Upper	Lower	Upper	Lower	Upper
Si	0.450000	0.570000	0.450000	0.570000	0.000000	0.413793
Ca	0.050000	0.160000	0.050000	0.160000	0.000000	0.379310
Al	0.130000	0.200000	0.130000	0.200000	0.000000	0.241379

Mg	0.030000	0.100000	0.030000	0.100000	0.000000	0.241379
Fe	0.050000	0.120000	0.050000	0.120000	0.000000	0.241379
Na	0.000000	0.040000	0.000000	0.040000	0.000000	0.137931
K	0.000000	0.040000	0.000000	0.040000	0.000000	0.137931

Optimal Design: Si, Ca, Al, Mg, Fe, Na, K

Mixture design selected using distance-based optimality

(parameters calculated for component proportions)

Number of candidate design points: 541

Number of design points in optimal design: 30

Number of components: 7

Row number of selected design points: 27, 35, 46, 64, 2, 7, 55, 325, 395, 57, 433,
15, 5, 12,99, 349, 427, 19, 70, 378, 158, 40, 42, 495, 244, 53,61, 298, 373, 278

Smallest distance between optimal points: 0.063246

Largest distance between optimal points: 0.200998

CHULALONGKORN UNIVERSITY

Design Table

Run	Si	Ca	Al	Mg	Fe	Na	K
2	0.45	0.16	0.20	0.10	0.05	0.00	0.04
5	0.45	0.16	0.20	0.03	0.12	0.00	0.04
7	0.57	0.05	0.20	0.03	0.12	0.00	0.03
12	0.48	0.16	0.20	0.03	0.05	0.04	0.04
15	0.57	0.14	0.13	0.03	0.05	0.04	0.04
19	0.57	0.07	0.20	0.03	0.05	0.04	0.04

Run	Si	Ca	Al	Mg	Fe	Na	K
27	0.57	0.15	0.20	0.03	0.05	0.00	0.00
35	0.45	0.05	0.20	0.10	0.12	0.04	0.04
40	0.45	0.16	0.13	0.10	0.08	0.04	0.04
42	0.57	0.11	0.13	0.10	0.05	0.00	0.04
46	0.57	0.05	0.13	0.10	0.07	0.04	0.04
53	0.57	0.16	0.13	0.09	0.05	0.00	0.00
55	0.52	0.16	0.13	0.10	0.05	0.04	0.00
57	0.57	0.08	0.20	0.10	0.05	0.00	0.00
61	0.52	0.05	0.20	0.03	0.12	0.04	0.04
64	0.48	0.16	0.13	0.03	0.12	0.04	0.04
70	0.57	0.07	0.13	0.03	0.12	0.04	0.04
99	0.53	0.05	0.20	0.10	0.12	0.00	0.00
158	0.45	0.13	0.20	0.10	0.09	0.04	0.00
244	0.57	0.05	0.15	0.10	0.12	0.00	0.02
278	0.57	0.16	0.13	0.03	0.09	0.00	0.02
298	0.53	0.12	0.13	0.03	0.12	0.04	0.04
325	0.57	0.12	0.13	0.07	0.12	0.00	0.00
349	0.49	0.09	0.13	0.10	0.12	0.04	0.04
373	0.53	0.12	0.20	0.03	0.05	0.04	0.04
378	0.53	0.16	0.17	0.03	0.12	0.00	0.00
395	0.51	0.11	0.20	0.03	0.12	0.04	0.00
427	0.49	0.09	0.20	0.10	0.05	0.04	0.04
433	0.47	0.16	0.15	0.10	0.12	0.00	0.00
495	0.51	0.13	0.18	0.08	0.07	0.01	0.01

ภาคผนวก ค

ตารางที่ ค-1 ผลองค์ประกอบทางเคมีของแก้วฐานบะซอลต์

สูตร	องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละน้ำหนัก)							
	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂
BG 1	47.2	14	18	7.51	5.43	3.89	2.79	0.858
BG 2	47.6	14.3	18.5	2.18	7.72	4.64	3.97	0.811
BG 3	44.7	5.68	19.7	9.5	10.7	4.31	4.44	0.748
BG 4	51.8	6.15	17.8	8.34	6.58	3.99	4.1	0.851
BG 5	45.3	17.5	15.1	2.4	10.5	3.95	4.2	0.825
BG 6	40.5	17.5	19.2	8.41	5.85	3.64	4.01	0.688
BG 7	52.4	6.27	20	2.21	10.1	4.57	3.15	0.933
BG 8	44.9	17	14.9	7.55	7.19	3.6	3.69	0.793
BG 9	48.9	7.99	18.3	7.07	8.21	4.24	4.18	0.824
BG 10	41.1	17.3	20.3	2.13	10.5	3.49	4.27	0.722
BG 11	49	14.2	17.8	1.87	8.48	3.36	4.06	0.883
BG 12	44.6	17.7	19.8	1.88	7.04	3.52	4.33	0.783
BG 13	48.6	5.66	18.8	7.2	10.4	3.97	4.19	0.825
BG 14	52.8	7.34	19.6	1.94	8.98	3.61	4.35	0.934
BG 15	52.4	7.45	18.7	1.83	10.5	3.56	4.3	0.948
BG 16	42.1	17.3	13.5	10.5	6.67	4.66	4.08	0.674
BG 17	46.6	10.2	16.5	9.03	7.48	5.2	3.66	0.784
BG 18	44.7	14.4	16	7.65	7.39	4.88	3.72	0.748
BG 19	50	5.49	20.1	2.9	10.5	5.21	4.4	0.84
BG 20	46.6	11	16.7	5.66	9.39	5.27	4.02	0.823

ตารางที่ ค-1(ต่อ) ผลองค์ประกอบทางเคมีของแก้วฐานบะซอลต์

สูตร	องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละน้ำหนัก)							
	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₂	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂
BG 21	46	11	19.9	2.85	10.2	4.91	3.85	0.827
BG 22	40.6	16.2	14.9	9.85	9.45	4.57	3.3	0.695
BG 23	45.4	9.28	14.3	10.4	10.4	4.73	4.19	0.811
BG 24	44.9	9.1	18.9	10.1	6.79	4.64	4.22	0.763
BG 25	44.7	16.3	16.2	2.59	10.1	4.97	3.87	0.806
BG 26	41.4	13.3	19.3	9.78	7.09	4.5	3.44	0.761
BG 27	49.5	5.96	16.2	9.3	9.52	5.41	2.7	0.849
BG 28	47.2	12.6	16.3	2.54	10.9	4.63	4.31	0.901
BG 29	47.7	12.1	19.8	2.5	7.64	4.48	4.31	0.866
BG 30	48.6	15.8	17.7	2.3	7	5.02	2.17	0.854

ภาคผนวก ง

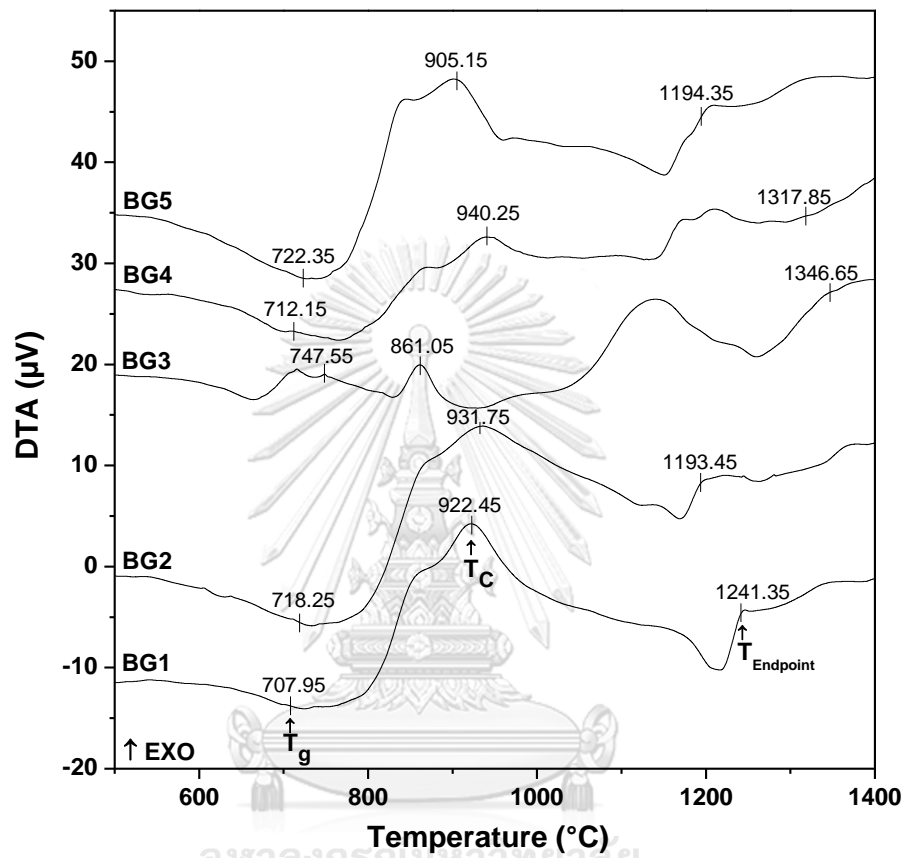
ตารางที่ ง-1 ผลองค์ประกอบทางเคมีของแก้วฐานบะซอลต์

องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละน้ำหนัก)	หินบะซอลต์
SiO ₂	60.060
CaO	5.847
Al ₂ O ₃	16.535
MgO	3.231
Fe ₂ O ₃	8.080
Na ₂ O	2.641
K ₂ O	2.214
TiO ₂	0.949
MnO	0.170
V ₂ O ₅	0.020
Cr ₂ O ₃	0.033
SrO	0.083
BaO	0.071
ZnO	0.011
CuO	0.007
ZrO ₂	0.050

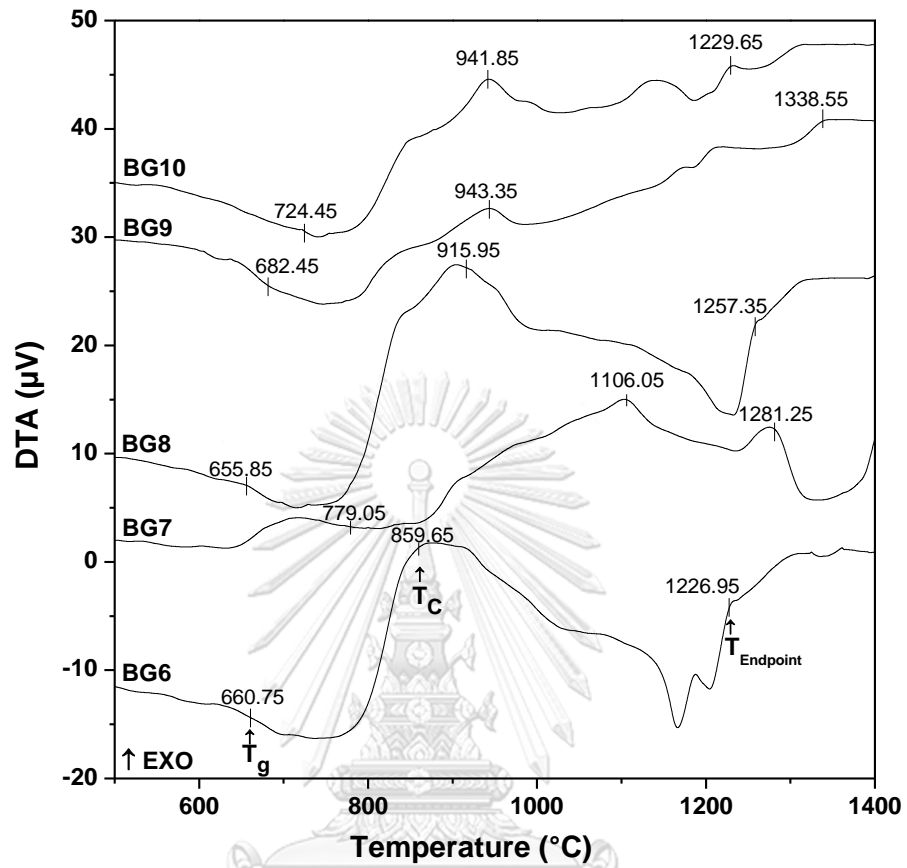
หมายเหตุ ; หินบะซอลต์ จากหลุมเจาะในเขตสัมปทานของ บริษัท ไมน์เค็ม จำกัด อ.ชัยบาดาล

จ.ลพบุรี ประเทศไทย

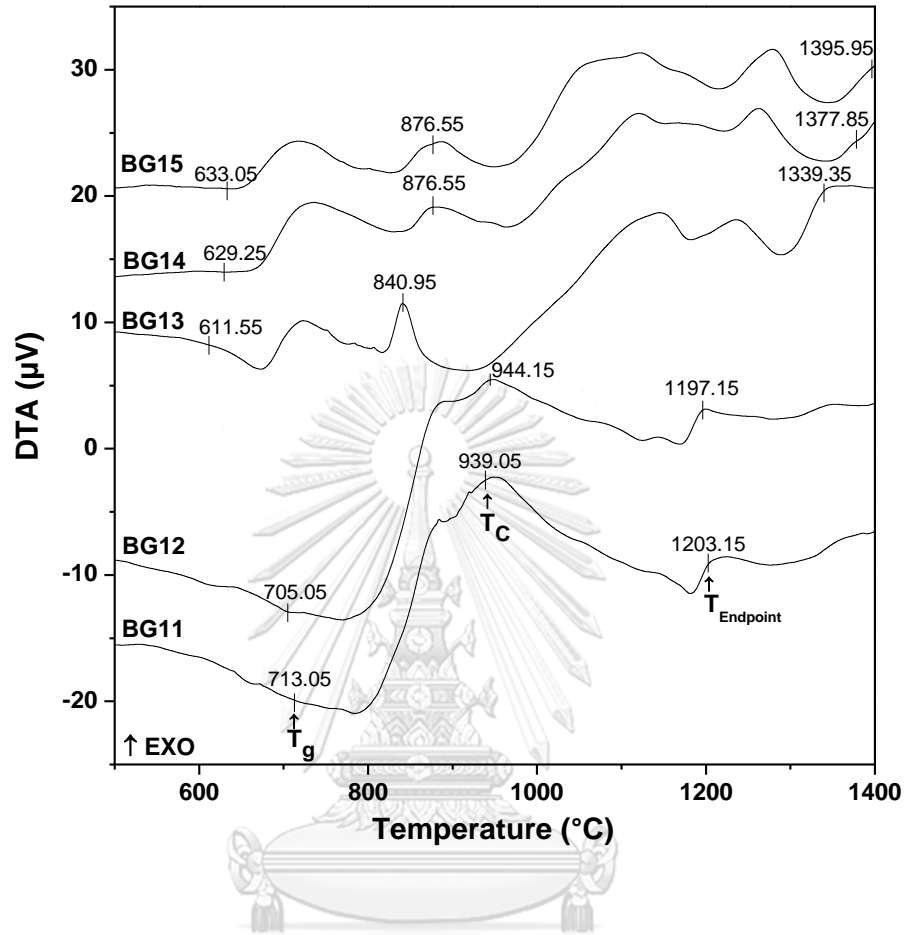
ภาคผนวก จ



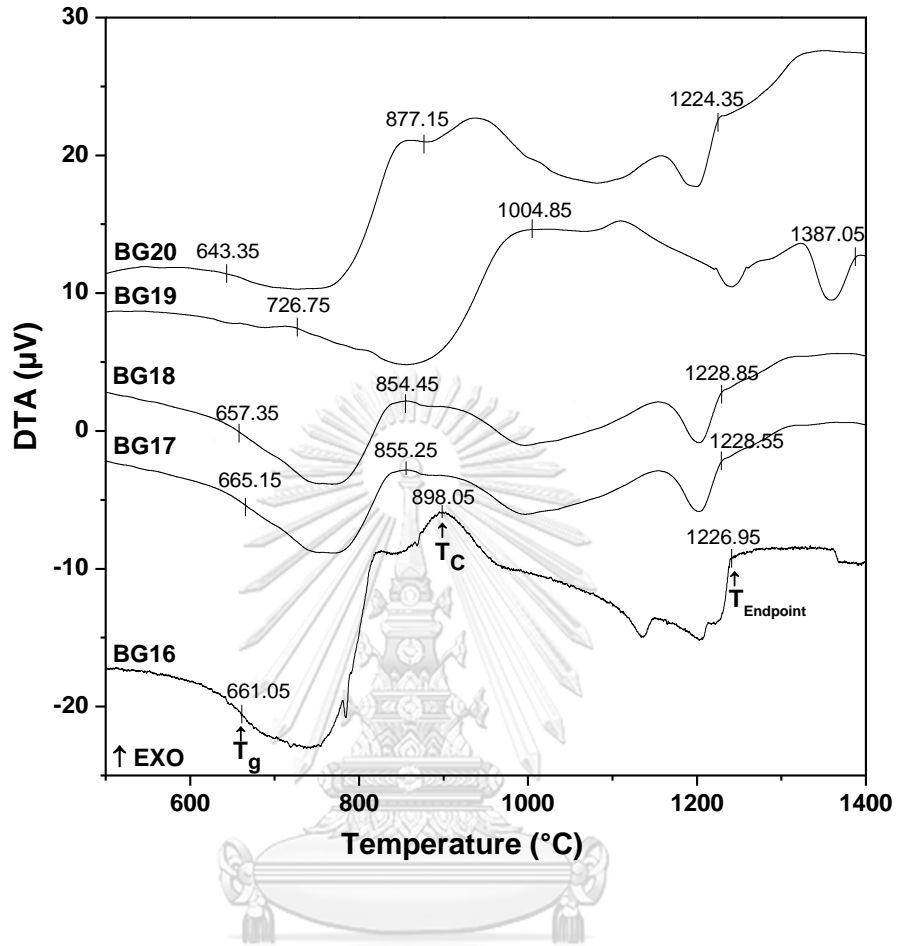
รูปที่ ง-1 กราฟ DTA แสดงค่า T_g T_c $T_{Endpoint}$ ของแก้วฐานบะซอลต์สูตรที่ 1 - 5



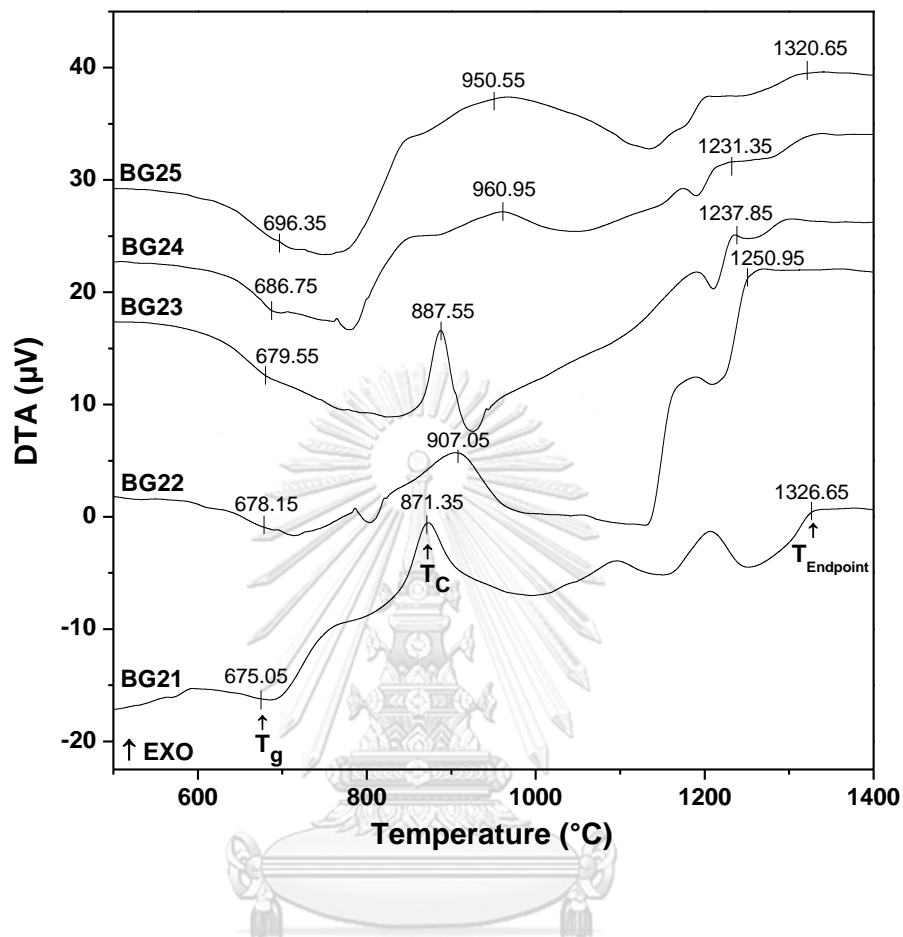
รูปที่ ง-2 กราฟ DTA แสดงค่า T_g T_c T_{Endpoint} ของแก้วฐานบะซอลต์สูตรที่ 6 - 10



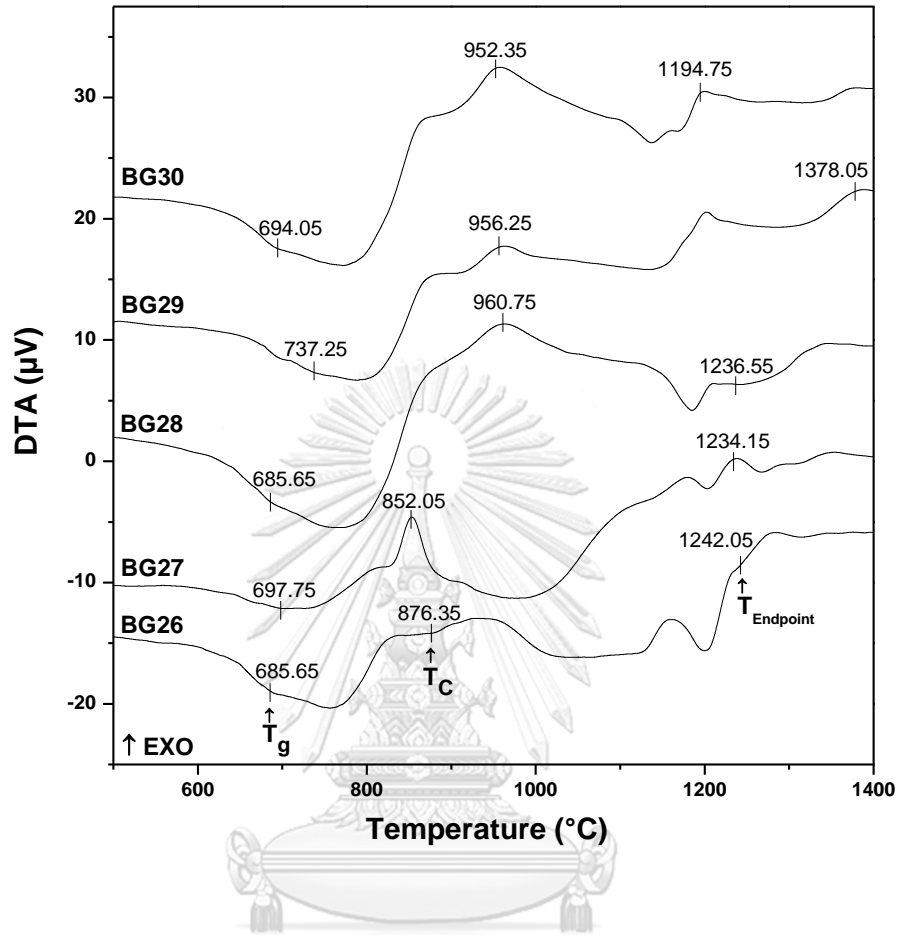
รูปที่ ง-3 กราฟ DTA แสดงค่า T_g , T_c , T_{Endpoint} ของแก้วฐานอะซอลต์สูตรที่ 11 - 15



รูปที่ ง-4 กราฟ DTA แสดงค่า T_g T_c T_{Endpoint} ของแก้วฐานบะซอลต์สูตรที่ 16 - 20

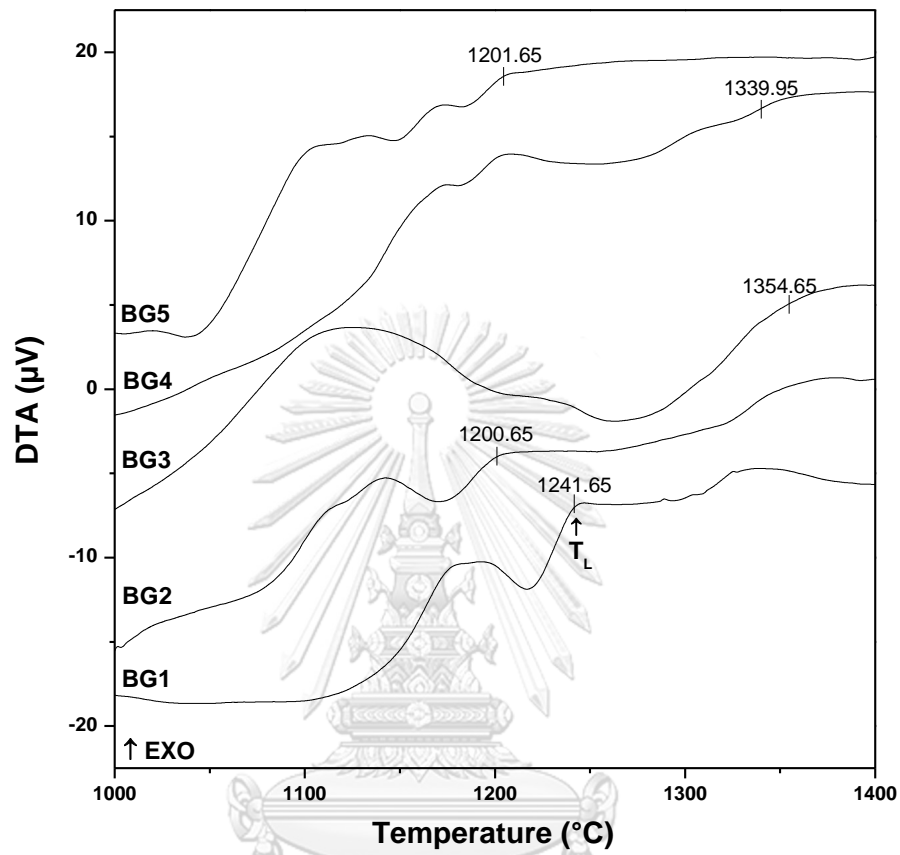


รูปที่ ง-5 กราฟ DTA แสดงค่า T_g T_c T_{Endpoint} ของแก้วฐานอะซอลต์สูตรที่ 21 - 25

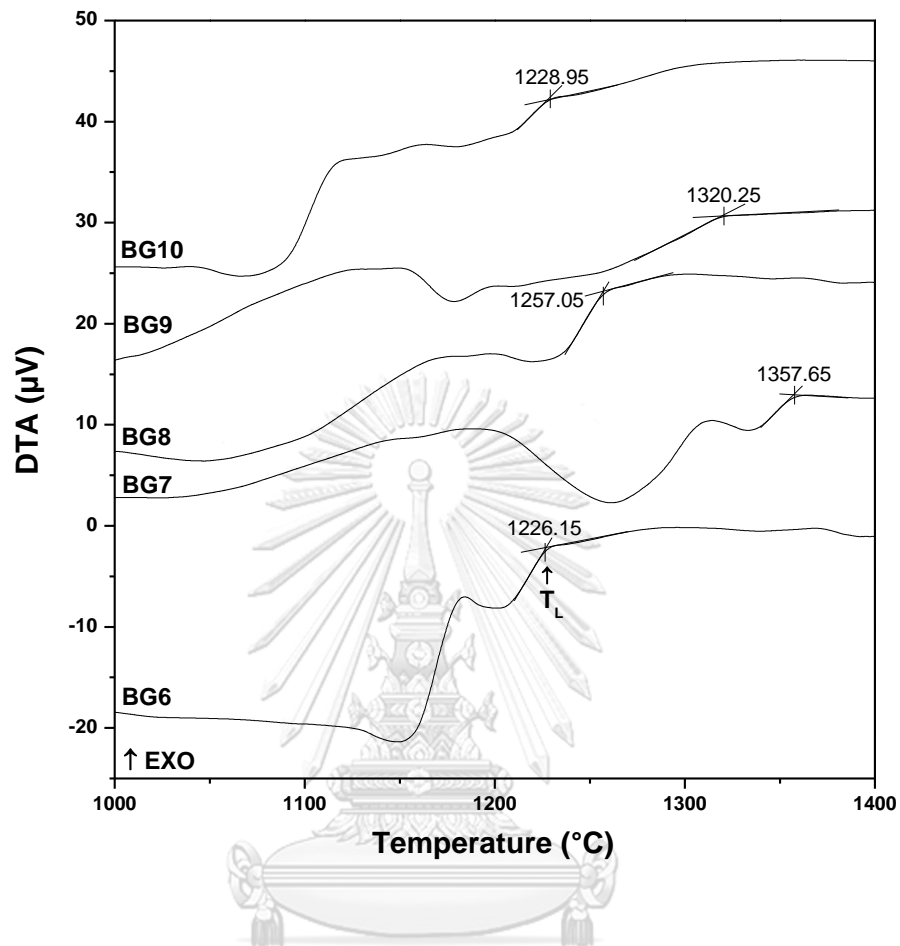


รูปที่ ง-5 กราฟ DTA แสดงค่า T_g T_c T_{Endpoint} ของแก้วฐานอะซอลต์สูตรที่ 26 - 30

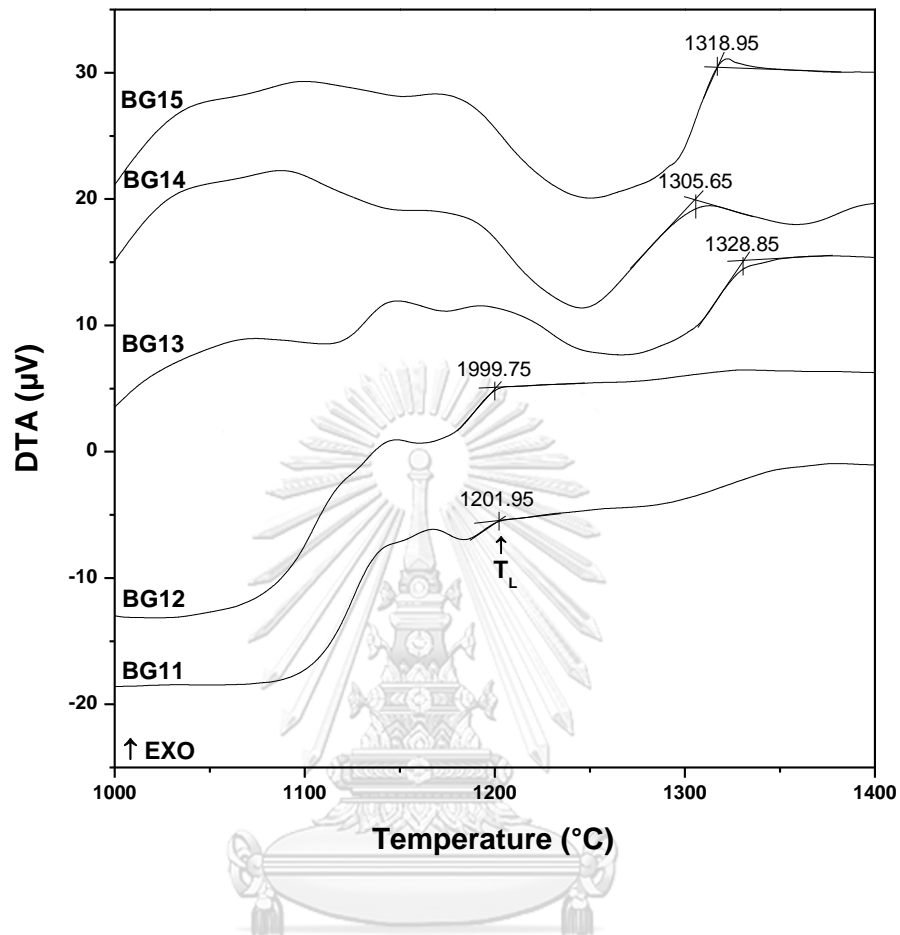
ภาคผนวก ฉ



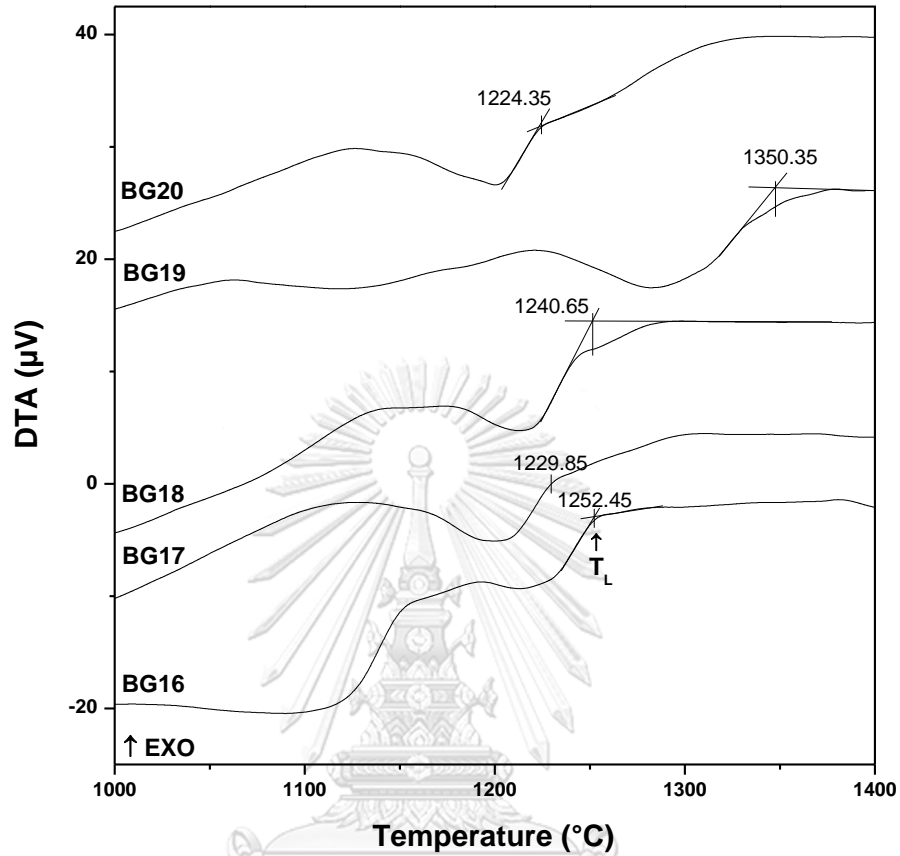
รูปที่ จ-1 กราฟ DTA แสดงค่า T_L ของแก้วฐานบะซอลต์สูตรที่ 1 - 5



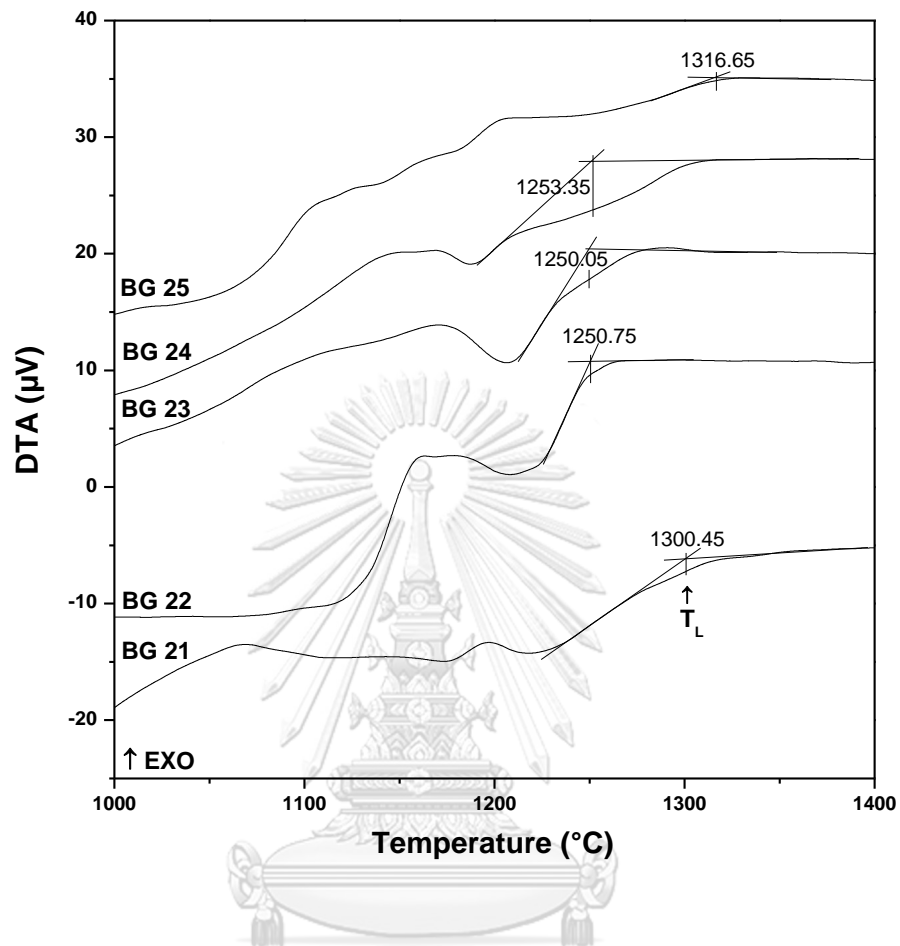
รูปที่ จ-2 กราฟ DTA แสดงค่า T_L ของแก้วฐานปะชอลต์สูตรที่ 6 - 10



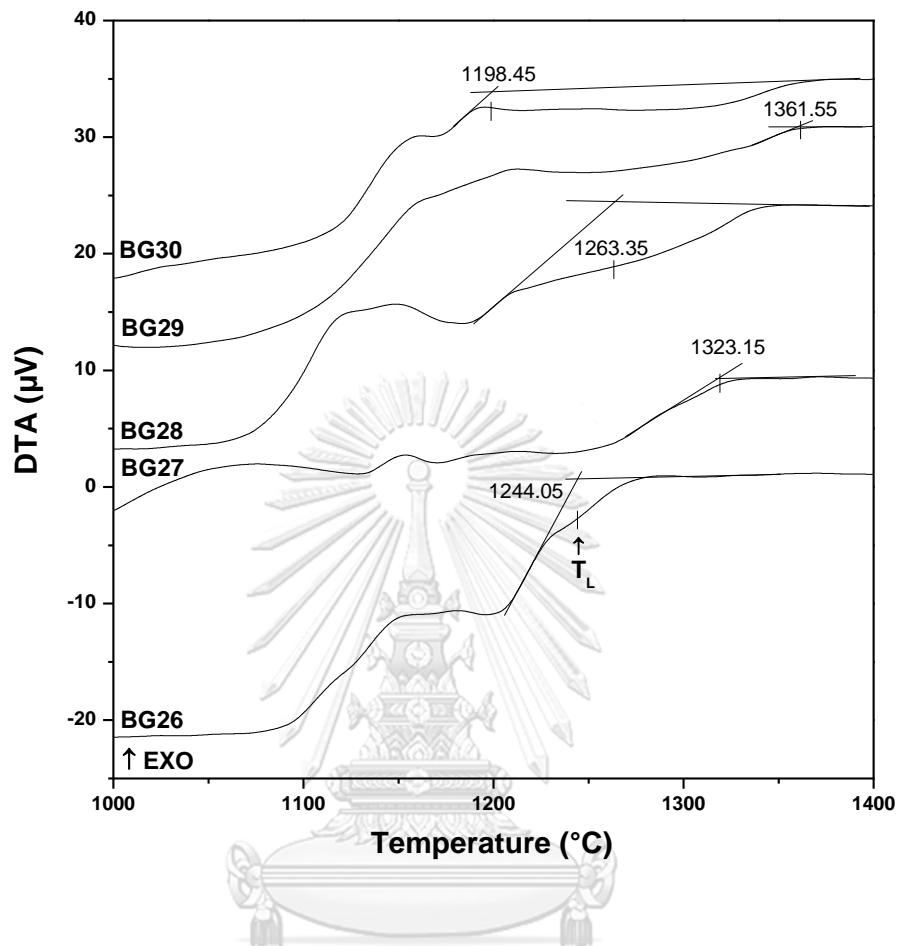
รูปที่ จ-3 กราฟ DTA แสดงค่า T_L ของแก้วฐานบะซอลต์สูตรที่ 11 - 15



รูปที่ จ-4 กราฟ DTA แสดงค่า T_L ของแก้วฐานอะซอลต์สูตรที่ 16 - 20



รูปที่ จ-5 กราฟ DTA แสดงค่า T_L ของแก้วฐานอะซอลต์สูตรที่ 21 - 25



รูปที่ จ-6 กราฟ DTA แสดงค่า T_L ของแก้วฐานอะซอลต์สูตรที่ 25 - 30

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวณภาพร ้วยบริสุทธิ์ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี หลักสูตรวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ในปี พ.ศ.2558 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท หลักสูตรวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีเซรามิก ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำเร็จการศึกษา ในปี พ.ศ. 2561

การนำเสนอผลงานทางวิชาการ

Napaporn Vaiborisut, Chanittha Chunwises, Dararat Boonbundit, Sirithan Jiemsirilera, and Apirat Theerapapvisetpong. Effect of the addition of ZrSiO₄ on Alkali-resistance and Liquidus temperature of Basaltic Glass. International Conference on Traditional and Advanced Ceramics 2017 (ICTA2017). Bangkok International Trade & Exhibition Center (BITEC), Bangkok, Thailand (August 31 - September 1, 2017). (Poster presentation)

การตีพิมพ์ผลงานทางวิชาการ

Vaiborisut, N., Chunwises, C., Boonbundit, D., Jiemsirilera, S., and Theerapapvisetpong, A. 2018. Effect of the Addition of ZrSiO₄ on Alkali-Resistance and Liquidus Temperature of Basaltic Glass. Key Engineering Materials 766: 145-150.