การเตรียมเซรามิกซิลิกาพรุนจากกากเบ้าหลอมฟิวส์ซิลิกา

นางสาวเก็จแก้ว ก้านลาย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีเซรามิก ภาควิชาวัสดุศาสตร์
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2560
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PREPARATION OF POROUS SILICA CERAMICS USING FUSED SILICA CRUCIBLE WASTE

Miss Kedkaew Kanlai

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

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	การเตรียมเซรามิกซิลิกาพรุนจากกากเบ้าหลอมฟิวส์ซิลิกา
โดย	นางสาวเก็จแก้ว ก้านลาย
สาขาวิชา	เทคโนโลยีเซรามิก
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กานต์ เสรีวัลย์สถิตย์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนากร วาสนาเพียรพงศ์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

....คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

....ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.นิศานาถ ไตรผล)

....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กานต์ เสรีวัลย์สถิตย์)

....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนากร วาสนาเพียรพงศ์)

....กรรมการ

(อาจารย์ ดร.อภิรัฐ ธีรภาพวิเศษพงษ์)

....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ดร.จรัสพร มงคลขจิต)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

เก็จแก้ว ก้านลาย : การเตรียมเซรามิกซิลิกาพรุนจากกากเบ้าหลอมฟิวส์ซิลิกา (PREPARATION OF POROUS SILICA CERAMICS USING FUSED SILICA CRUCIBLE WASTE) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร.กานต์ เสรีวัลย์สถิตย์, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ผศ. ดร.ธนากร วาสนาเพียรพงศ์, 91 หน้า.

เซรามิกซิลิกาพรุนเป็นวัสดุที่มีการใช้งานที่หลากหลาย เนื่องจากมีสมบัติเด่นหลายประการ เช่น มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ ทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลันได้ดี และมีความทนไฟสูง งานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาการเตรียมเซรามิกซิลิกาพรุนจากกากเบ้าหลอมฟิวส์ซิลิกาที่ใช้ในกระบวนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อใช้งานเป็นแบบหล่อสำหรับขึ้นรูปกระจกหลอม เนื่องจากกากเบ้าหลอมฟิวส์ซิลิกามีความบริสุทธิ์สูง และมีโครงสร้างอสัณฐานทำให้ทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลันได้ดี นอกจากนี้ยังมีองค์ประกอบทางเคมีใกล้เคียงกับกระจก จึงช่วยลดโอกาสการเกิดการปนเปื้อนบนผิวของกระจกหลอมได้อีกด้วย ในงานวิจัยนี้ทำการขึ้นรูปเซรามิกซิลิกาพรุนด้วยวิธีการหล่อแบบโดยทำการศึกษาถึงผลของชนิดและปริมาณของตัวเชื่อมประสานต่อสมบัติของแบบหล่อก่อนเผาและหลังเผา ซึ่งแบ่งชนิดตัวเชื่อมประสานเป็น 2 ชนิดหลักๆ คือ ตัวเชื่อมประสานอนินทรีย์ ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวและปูนซีเมนต์อะลูมินาสูง และตัวเชื่อมประสานอินทรีย์ ได้แก่ แป้งข้าวเหนียว จากการทดลองพบว่าชิ้นงานที่ใช้ตัวเชื่อมประสานปูนซีเมนต์อะลูมินาสูงร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก เผาที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส มีความหนาแน่น 1.17 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ความพรุนตัวร้อยละ 49.60 ความต้านทานต่อแรงกด 5.76 เมกะพาสคัล โครงสร้างของชิ้นงานยังคงเป็นอสัณฐาน และมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน 2.26×10^{-6} $^{o}C^{-1}$ ชิ้นงานสามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงต่ออุณหภูมิอย่างฉับพลันได้ 5 รอบโดยไม่เกิดการแตกร้าว เมื่อเปรียบเทียบสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมได้กับตัวอย่างทางการค้า ชิ้นงานที่เตรียมได้มีสมบัติใกล้เคียงกับตัวอย่างทางการค้า จึงมีความเป็นไปได้ที่จะใช้ตัวอย่างที่เตรียมได้เป็นแบบหล่อสำหรับขึ้นรูปกระจกหลอม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาควิชา	วัสดุศาสตร์	ลายมือชื่อนิสิต	....
สาขาวิชา	เทคโนโลยีเซรามิก	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก	....
ปีการศึกษา	2560	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม	....

5871915023 : MAJOR CERAMIC TECHNOLOGY
KEYWORDS: FUSED SILICA / POROUS CERAMICS / SLUMPING MOLD

KEDKAEW KANLAI: PREPARATION OF POROUS SILICA CERAMICS USING FUSED SILICA CRUCIBLE WASTE. ADVISOR: ASST. PROF. KARN SERIVALSATIT, Ph.D., CO-ADVISOR: ASST. PROF. THANAKORN WASANAPIARNPONG, D.Eng., 91 pp.

Porous silica ceramics have found broad applications due to their unique properties such as low thermal expansion coefficient, excellent thermal shock resistance and high refractoriness. This research focused on preparation of porous fused silica ceramics using industrial fused silica crucible waste. These ceramics are potentially used as a glass slumping mold for forming slumped glass. The fused silica crucible waste is high purity amorphous silica. Consequently, it has excellent thermal shock resistance and contamination on the surface of slumped glass can be reduced. In this study, porous fused silica ceramics were prepared from industrial fused silica crucible waste by casting method using inorganic binder, namely high-alumina cement and white portland cement, and organic binder, namely glutinous rice flour. The effects of binder content and type of binder on properties of porous fused silica ceramics were investigated. The results showed that the fused silica ceramics containing 10 wt% high-alumina cement sintered at 1100 °C for an hour exhibited the optimal properties. Bulk density, apparent porosity and cold crushing strength of the fused silica ceramics were 1.17 g/cm^3, 49.60 % and 5.76 MPa, respectively. The phase of the sintered samples remained amorphous with thermal expansion coefficient of 2.26 x 10^{-6} °C^{-1}. No crack was visually observed on the sintered sample surface after 5 cycles of thermal shocking. By comparing with properties of a commercial slumping mold, this sample is promising to be used as a slumping mold.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

Department:	Materials Science	Student's Signature	....
Field of Study:	Ceramic Technology	Advisor's Signature	....
Academic Year:	2017	Co-Advisor's Signature	....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องด้วยความช่วยเหลือและสนับสนุนจากบุคคลและหน่วยงานต่างๆ ดังต่อไปนี้

ขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กานต์ เสรีวัลย์สถิตย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนากร วาสนาเพียรพงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้คำปรึกษา ให้ความรู้ ตลอดระยะเวลาในการทำงานวิจัยรวมถึงให้ข้อเสนอแนะเพิ่มเติม ตลอดจนปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้ถูกต้องและสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ภายใต้โครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม (พวอ.) ระดับปริญญาโท ปี 2559 ภายใต้สัญญาเลขที่ MSD59I0026 และบริษัทอิตาเลี่ยน-ไทย เซรามิค วัสดุทนไฟ จำกัด

ขอขอบคุณนายนิธิวัชร์ นวอัครฐานันท์ ที่ให้คำแนะนำ และสอนการใช้เครื่องมือทดสอบต่าง ๆ ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับเครื่องมือและอุปกรณ์การทางการวิจัย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย .... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .... จ

กิตติกรรมประกาศ .... ฉ

สารบัญ .... ช

สารบัญตาราง .... ฏ

สารบัญรูป .... ฐ

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 2

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 2

บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 3

2.1 ซิลิกา 3

2.2 ฟิวส์ซิลิกา 4

2.3 กากเบ้าหลอมฟิวส์ซิลิกา 4

2.4 กระจกหลอม 5

2.4.1 กระบวนการขึ้นรูปกระจกหลอม 5

2.4.2 สมบัติสำคัญของแบบหล่อสำหรับขึ้นรูปกระจกหลอม 6

2.5 วัสดุทนไฟ 7

2.6 ตัวเชื่อมประสาน 9

2.6.1 ปูนซีเมนต์ 10

2.6.2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาว (white portland cement) 12

2.6.3 ปูนซีเมนต์อะลูมินาสูง (high alumina cement) 13

หน้า

2.6.4 แป้ง (starch) 15
2.6.5 แป้งข้าวเหนียว (glutinous rice flour) 17
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย 20
3.1 วัตถุดิบ สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง 20
3.1.1 วัตถุดิบและสารเคมี 20
3.2 ขั้นตอนการวิจัย 20
3.2.1 การวิเคราะห์วัตถุดิบ 20
3.2.1.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ 20
3.2.1.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสของวัตถุดิบ 20
3.2.1.3 การวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของวัตถุดิบ 20
3.2.2 การเตรียมและศึกษาอัตราส่วนของตัวเชื่อมประสานชนิดต่าง ๆ ที่เหมาะสมกับการขึ้นรูปด้วยวิธีหล่อแบบ 21
3.2.2.1 ตัวเชื่อมประสานอนินทรีย์ 21
3.2.2.2 ตัวเชื่อมประสานอินทรีย์ 22
3.3 แผนผังการทดลอง 23
3.4 การวิเคราะห์และทดสอบสมบัติของชิ้นงาน 25
3.4.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบเฟส 25
3.4.2 ความหนาแน่น 25
3.4.3 ความพรุนตัว 25
3.4.4 การดูดซึมน้ำ 25
3.4.5 การหดตัวเชิงปริมาตร 26
3.4.6 การสูญเสียน้ำหนักหลังเผา 26
3.4.7 ความแข็งแรง 26

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

หน้า

3.4.8 การขยายตัวเนื่องจากความร้อน 27
3.4.9 ความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลัน 27
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล 28
4.1 ผลการวิเคราะห์วัตถุดิบ 28
4.1.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ 28
4.1.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสของวัตถุดิบ 29
4.1.3 ผลการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของวัตถุดิบ 31
4.1.4 ผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของวัตถุดิบ 32
4.2 ผลการศึกษาปริมาณของตัวเชื่อมประสานอนินทรีย์ที่เหมาะสมกับการขึ้นรูปด้วยวิธี หล่อแบบต่อสมบัติของชิ้นงานก่อนและหลังเผา 34
4.2.1 ชิ้นงานที่ใช้ปูนซีเมนต์อะลูมินาสูงเป็นตัวเชื่อมประสาน 34
4.2.1.1 ความแข็งแรงของชิ้นงานก่อนเผา 34
4.2.1.2 การสูญเสียน้ำหนักหลังเผา 34
4.2.1.3 ความหนาแน่น ความพรุนตัว และการดูดซึมน้ำ 35
4.2.1.4 ความแข็งแรงหลังเผา 38
4.2.1.5 องค์ประกอบเฟสของชิ้นงานหลังเผา 39
4.2.1.6 โครงสร้างจุลภาค 43
4.2.2 ชิ้นงานที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวเป็นตัวเชื่อมประสาน 44
4.2.2.1 ความแข็งแรงก่อนเผา 44
4.2.2.2 การสูญเสียน้ำหนักหลังเผา 45
4.2.2.3 ความหนาแน่น ความพรุนตัว และการดูดซึมน้ำ 46
4.2.2.4 ความแข็งแรงหลังเผา 49
4.2.2.5 องค์ประกอบเฟสของชิ้นงานหลังเผา 50

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

หน้า

4.2.2.6 โครงสร้างจุลภาค 53

4.3 การศึกษาปริมาณตัวเชื่อมประสานอินทรีย์ที่เหมาะสมกับการขึ้นรูปด้วยวิธีหล่อแบบต่อสมบัติของชิ้นงานก่อนและหลังเผา 55

4.3.1 แป้งข้าวเหนียว..55

4.3.1.1 ความแข็งแรงก่อนเผา..55

4.3.1.2 การสลายตัวทางความร้อนของแป้งข้าวเหนียว..56

4.3.1.3 ความหนาแน่น ความพรุนตัว และการดูดซึมน้ำ..57

4.3.1.4 ความแข็งแรงหลังเผา..59

4.3.1.5 องค์ประกอบเฟสของชิ้นงานหลังเผา..59

4.3.1.6 โครงสร้างจุลภาค 60

4.3.1.7 สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน 61

4.3.1.8 ผลของปริมาณแป้งข้าวเหนียวต่อสมบัติของชิ้นงานหลังเผา..62

4.4 การเปรียบเทียบสมบัติของชิ้นงานที่ใช้ชนิดของตัวเชื่อมประสานต่างกัน 64

4.4.1 การเปรียบเทียบสมบัติของชิ้นงานกับแม่แบบสำหรับผลิตกระจกหลอมที่ใช้งานในปัจจุบัน..64

4.4.2 ร้อยละการหดตัว..65

4.4.3 องค์ประกอบเฟส 66

4.4.4 การขยายตัวเนื่องจากความร้อน 67

4.4.5 ความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลัน..68

4.5 การศึกษาการขึ้นรูปชิ้นงานขนาดใหญ่เพื่อใช้เป็นแบบหล่อสำหรับการผลิตกระจกหลอม....69

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ 72

5.1 สรุปผลการวิจัย..72

5.2 ข้อเสนอแนะ 73

รายการอ้างอิง..74

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

หน้า

ภาคผนวก 78

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 91

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 สมบัติของแบบหล่อต่างๆที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมผลิตกระจกหลอม 7

ตารางที่ 2.2 ลักษณะเฉพาะของแป้งแต่ละชนิด 18

ตารางที่ 3.1 ปริมาณส่วนผสมที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่าง 21

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ 28

ตารางที่ 4.2 สมบัติของชิ้นงานกับแม่แบบสำหรับผลิตกระจกหลอมที่ใช้งานในปัจจุบัน 65

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 การเปลี่ยนแปลงรูปแบบผลึกของซิลิกา 3

รูปที่ 2.2 กระบวนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ 5

รูปที่ 2.3 การให้ความร้อนในกระบวนการขึ้นรูปกระจกหลอม..... 6

รูปที่ 2.4 กระบวนการขึ้นรูปกระจกหลอม 6

รูปที่ 2.5 ความแตกต่างของความดันที่บริเวณต่าง ๆ ของชิ้นงานในการขึ้นรูปแบบอัด 9

รูปที่ 2.6 ชิ้นงานขนาดใหญ่เผาที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง 13

รูปที่ 2.7 สมบัติเชิงกลของวัสดุทนไฟอะลูมินาที่อุณหภูมิ 110 ถึง 1500 องศาเซลเซียส..... 14

รูปที่ 2.8 ความหนาแน่นและความพรุนตัวของวัสดุทนไฟอะลูมินา ที่อุณหภูมิ 110 ถึง 1500 องศาเซลเซียส..... 15

รูปที่ 2.9 โครงสร้างของอะไมโลสและอะไมโลเพคติน 16

รูปที่ 2.10 กระบวนการสตาร์ชคอนโซลิเดชัน 17

รูปที่ 2.11 (ก) ชิ้นงานก่อนเผา (ข) ชิ้นงานหลังเผาที่อุณหภูมิ 1275 องศาเซลเซียส..... 18

รูปที่ 2.12 (ก) ชิ้นงานก่อนเผา (ข) ชิ้นงานหลังเผา (ค) ชิ้นงานหลังเผาที่ผ่านการตกแต่ง ที่อุณหภูมิ 1600 องศาเซลเซียส..... 19

รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการเตรียมเซรามิกซิลิกาพรุนด้วยตัวเชื่อมประสานอนินทรีย์ 23

รูปที่ 3.2 แผนผังแสดงขั้นตอนการเตรียมเซรามิกซิลิกาพรุนด้วยตัวเชื่อมประสานอินทรีย์ 24

รูปที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสของผงฟิวส์ซิลิกา 29

รูปที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสของปูนซีเมนต์อะลูมินาสูง..... 30

รูปที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาว..... 30

รูปที่ 4.4 การกระจายขนาดอนุภาคของผงฟิวส์ซิลิกา 31

รูปที่ 4.5 การกระจายขนาดอนุภาคของผงแป้งข้าวเหนียว 32

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูปที่ 4.6 โครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 500 เท่า และ 1500 เท่า ของ (ก, ข) ผงฟิวส์ซิลิกา (ค, ง) ผงปูนซีเมนต์อะลูมินาสูง (จ, ฉ) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาว ตามลำดับ....33

รูปที่ 4.7 ความแข็งแรงก่อนเผาของชิ้นงานที่มีปริมาณปูนซีเมนต์อะลูมินาสูงต่างกัน....34

รูปที่ 4.8 การสูญเสียน้ำหนักหลังเผาของชิ้นงานที่มีปริมาณปูนซีเมนต์อะลูมินาสูงต่างกัน....35

รูปที่ 4.9 ความหนาแน่นหลังเผาของชิ้นงานที่มีปริมาณปูนซีเมนต์อะลูมินาสูงต่างกัน....36

รูปที่ 4.10 ความพรุนตัวหลังเผาของชิ้นงานที่มีปริมาณปูนซีเมนต์อะลูมินาสูงต่างกัน....37

รูปที่ 4.11 การดูดซึมน้ำหลังเผาของชิ้นงานที่มีปริมาณปูนซีเมนต์อะลูมินาสูงต่างกัน....38

รูปที่ 4.12 ความแข็งแรงหลังเผาของชิ้นงานที่มีปริมาณปูนซีเมนต์อะลูมินาสูงต่างกัน....39

รูปที่ 4.13 องค์ประกอบเฟสของของชิ้นงานที่มีตัวเชื่อมประสานปูนซีเมนต์อะลูมินาสูงร้อยละ (ก) 5 (ข) 10 (ค) 15 และ (ง) 20....40

รูปที่ 4.14 องค์ประกอบเฟสของของชิ้นงานที่มีตัวเชื่อมประสานปูนซีเมนต์อะลูมินาสูงร้อยละ 5 ถึง 20 ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส....42

รูปที่ 4.15 โครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 1500 เท่า ของชิ้นงานที่มีร้อยละ 10 ของปูนซีเมนต์อะลูมินาสูงที่อุณหภูมิ (ก) 700 ℃ (ข) 800 ℃ (ค) 900 ℃ (ง) 1000 ℃ (จ) 1100℃ และ (ฉ) 1200 ℃....43

รูปที่ 4.16 ผล EDS ของชิ้นงานที่มีร้อยละ 10 ของปูนซีเมนต์อะลูมินาสูงที่อุณหภูมิ 1100℃....44

รูปที่ 4.17 ความแข็งแรงก่อนเผาของชิ้นงานที่มีปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวต่างกัน....45

รูปที่ 4.18 การสูญเสียน้ำหนักหลังเผาของชิ้นงานที่มีปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวต่างกัน....46

รูปที่ 4.19 ความหนาแน่นหลังเผาของชิ้นงานที่มีปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวต่างกัน....47

รูปที่ 4.20 ความพรุนตัวหลังเผาของชิ้นงานที่มีปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวต่างกัน....48

รูปที่ 4.21 การดูดซึมน้ำหลังเผาของชิ้นงานที่มีปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวต่างกัน....48

รูปที่ 4.22 ความแข็งแรงหลังเผาของชิ้นงานที่มีปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวต่างกัน....50

รูปที่ 4.23 องค์ประกอบเฟสของของชิ้นงานที่มีปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวร้อยละ (ก) 5 (ข) 10 (ค) 15 และ (ง) 20....51

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูปที่ 4.24 โครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 1500 เท่า และ 5000 เท่า ของชิ้นงานที่มีร้อยละ 5 ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวที่อุณหภูมิ (ก, ข) 900 ℃ (ค, ง) 1000 ℃ (จ, ฉ) 1100 ℃ และ (ช, ซ) 1200 ℃ 54

รูปที่ 4.25 องค์ประกอบเฟสของของชิ้นงานที่มีปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวร้อยละ 5 ที่อุณหภูมิ 1100 ถึง 1200 องศาเซลเซียส 55

รูปที่ 4.26 ความแข็งแรงก่อนเผาของชิ้นงานที่มีปริมาณแป้งข้าวเหนียวต่างกัน 56

รูปที่ 4.27 กราฟแสดง TG/DTA ของแป้งข้าวเหนียว 57

รูปที่ 4.28 ความหนาแน่น และความพรุนตัวของชิ้นงานหลังเผาที่มีปริมาณแป้งข้าวเหนียวร้อยละ 7 โดยน้ำหนัก 58

รูปที่ 4.29 การดูดซึมน้ำของชิ้นงานหลังเผาที่มีปริมาณแป้งข้าวเหนียวร้อยละ 7 โดยน้ำหนัก 58

รูปที่ 4.30 ความแข็งแรงของชิ้นงานหลังเผาที่มีปริมาณแป้งข้าวเหนียวร้อยละ 7 โดยน้ำหนัก 59

รูปที่ 4.31 องค์ประกอบเฟสของของชิ้นงานที่มีปริมาณแป้งข้าวเหนียวร้อยละ 7 โดยน้ำหนัก 60

รูปที่ 4.32 โครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 1500 เท่า ของชิ้นงานที่มีปริมาณแป้งข้าวเหนียวร้อยละ 7 โดยน้ำหนักที่อุณหภูมิ (ก) 1100 ℃ (ข) 1150 ℃ (ค) 1200 ℃ (ง) 1300 ℃ 61

รูปที่ 4.33 การขยายตัวเนื่องจากความร้อนของชิ้นงานที่มีปริมาณแป้งข้าวเหนียว ร้อยละ 7 ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่างกัน 62

รูปที่ 4.34 ความหนาแน่นและร้อยละความพรุนตัวของชิ้นงานที่มีปริมาณแป้งข้าวเหนียวต่างกันเผาที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียส 63

รูปที่ 4.35 ความแข็งแรงต่อแรงกดและความแข็งแรงต่อแรงดัดของชิ้นงานที่มีปริมาณแป้งข้าวเหนียวต่างกันเผาที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียส 63

รูปที่ 4.36 การหดตัวเชิงปริมาตรของชิ้นงานที่ปริมาณตัวเชื่อมประสานและอุณหภูมิต่างกัน 66

รูปที่ 4.37 องค์ประกอบเฟสของชิ้นงานที่ปริมาณตัวเชื่อมประสานและอุณหภูมิต่างกัน 67

รูปที่ 4.38 การขยายตัวเนื่องจากความร้อนของชิ้นงานที่ปริมาณตัวเชื่อมประสานและอุณหภูมิต่างกัน 68

รูปที่ 4.39 ความแข็งแรงหลังการทดสอบความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลัน...69

CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 4.40 (ก) ชิ้นงานขนาดใหญ่ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และ (ข) แป้งข้าวเหนียวร้อยละ 7 โดยน้ำหนัก เป็นตัวเชื่อมประสาน เผาที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียส....70

รูปที่ 4.41 ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปกระจกหลอม....70

รูปที่ 4.42 ชิ้นงานขนาดใหญ่ที่มีปริมาณปูนซีเมนต์อะลูมินาสูงร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก เผาที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส....71

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

อุตสาหกรรมที่มีการขยายตัวอย่างรวดเร็วในปัจจุบันได้สร้างกากของเสียที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ในกระบวนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์เองซึ่งเป็นพลังงานทางเลือกที่เข้ามามีบทบาทในการช่วยลดภาวะโลกร้อน มีการใช้ฟิวส์ซิลิกามาเป็นเบ้าหลอม โดยนำผงโลหะซิลิกอนหลอมลงในเบ้าหลอมฟิวส์ซิลิกา เมื่อเย็นตัวลงจะได้แท่งโลหะซิลิกอนซึ่งจะถูกนำไปตัดเพื่อผลิตเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ต่อไป สำหรับกระบวนการผลิตเบ้าหลอมฟิวส์ซิลิกานั้นจะเกิดผลิตภัณฑ์ของเสียเกิดขึ้นระหว่างกระบวนการผลิต และทางโรงงานผู้ผลิตยังไม่มีแนวทางในการนำกากของเสียเหล่านี้กลับมาใช้ใหม่ อย่างไรก็ตามกากเบ้าหลอมฟิวส์ซิลิกาที่เกิดขึ้นนั้นมีองค์ประกอบของซิลิกาที่มีความบริสุทธิ์สูง และมีโครงสร้างอสัณฐานทำให้ไม่เกิดการเปลี่ยนเฟสระหว่างได้รับความร้อนเหมือนซิลิกาที่อยู่ในรูปควอตซ์ (quartz) ทำให้ทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลันได้เป็นอย่างดี และมีความทนไฟสูง จึงมีแนวคิดที่จะนำกากเบ้าหลอมฟิวส์ซิลิกากลับมาใช้ใหม่ให้เกิดประโยชน์ และช่วยเพิ่มมูลค่าให้กับกากของเสีย

กระจกหลอมมีการใช้งานกันอย่างแพร่หลาย เช่น กระจกรถยนต์ เลนส์สายตา กระจกที่ใช้ในการประดับตกแต่ง ภาชนะในครัวเรือน เป็นต้น วิธีการขึ้นรูปกระจกหลอมที่นิยมใช้นั้นจะทำโดยการอาศัยแรงโน้มถ่วงให้กระจกอ่อนตัวโค้งเข้าแม่แบบ เรียกว่าวิธีสลัมปิง (slumping) โดยนำกระจกแผ่นเรียบวางบนแบบหล่อที่มีรูปร่างโค้งเว้าตามที่ต้องการ หลังจากนั้นนำเข้าเตาอบแล้วเพิ่มอุณหภูมิไปเป็น 500 องศาเซลเซียส คงอุณหภูมิไว้ระยะเวลาหนึ่งเพื่อให้การกระจายความร้อนสม่ำเสมอทั้งภายในแบบหล่อและกระจก จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิไปจนถึง 600 - 700 องศาเซลเซียส เพื่อให้กระจกหลอมและหย่อนตัวลงไปตามแบบหล่อรูปทรงต่าง ๆ แล้วคงอุณหภูมิตามเวลาที่ต้องการก่อนจะทำการลดอุณหภูมิลงอย่างรวดเร็วจนถึงอุณหภูมิห้อง เพื่อหลีกเลี่ยงการตกผลึกจนทำให้สูญเสียความมันวาวของกระจก

จากลักษณะการใช้งานจะเห็นได้ว่าสมบัติที่ต้องการสำหรับแบบหล่อที่ใช้ในการขึ้นรูปกระจกหลอม คือ ต้องมีความแข็งแรงและทนความร้อนสูงเพื่อที่จะสามารถรับน้ำหนักของกระจกระหว่างการขึ้นรูปที่อุณหภูมิสูงได้ สามารถตัดแต่งรูปร่างได้ง่าย มีผิวเรียบ นอกจากนี้ในกระบวนการผลิตกระจกหลอม แบบหล่อจะถูกให้ความร้อนสลับกับการลดอุณหภูมิจึงจำเป็นต้องมีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลันได้ดี แต่เนื่องจากการผลิตกระจกหลอมดังกล่าวต้องนำเข้าแบบหล่อวัสดุทนไฟจากต่างประเทศซึ่งมีราคาสูง ส่งผลให้มีต้นทุนในการผลิตสูง

CHULALONGKORN UNIVERSITY

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะศึกษาการขึ้นรูปเซรามิกซิลิกาพรุนด้วยวิธีหล่อแบบเพื่อใช้เป็นแบบหล่อสำหรับการขึ้นรูปกระจกหลอม จากฟิวส์ซิลิกาซึ่งเป็นของเสียจากกระบวนการผลิตเบ้าหลอมฟิวส์ซิลิกาสำหรับผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ โดยทำการศึกษาถึงผลของชนิดและปริมาณของตัวเชื่อมประสาน ต่อสมบัติของแบบหล่อก่อนเผาและหลังเผา ได้แก่ อุณหภูมิการเผา โครงสร้างจุลภาค ความหนาแน่น ความพรุนตัว ความแข็งแรง และสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนเพื่อให้มีสมบัติที่เหมาะสมต่อการใช้งาน

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 ศึกษาการเตรียมเซรามิกซิลิกาพรุนจากกากเบ้าหลอมฟิวส์ซิลิกาด้วยวิธีหล่อแบบสำหรับใช้เป็นแม่แบบในการขึ้นรูปกระจกหลอม

1.2.2 ศึกษาผลของชนิดและอัตราส่วนของตัวเชื่อมประสานต่อสมบัติก่อนเผาและหลังเผาชิ้นงาน

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

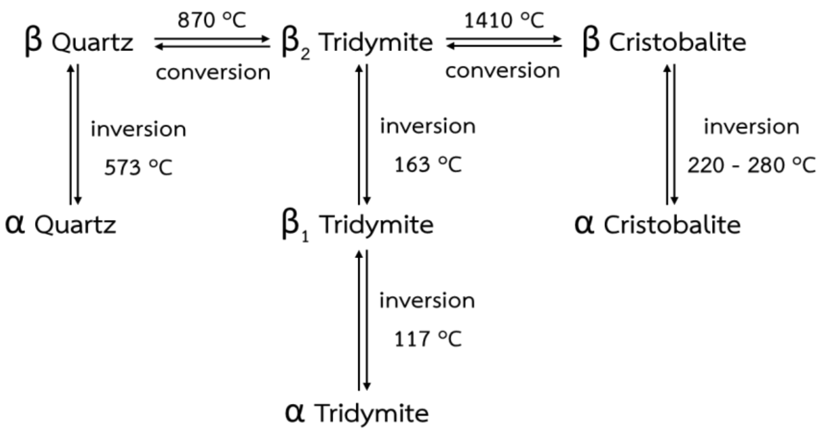
ได้เซรามิกซิลิกาพรุนที่ผลิตจากกากเบ้าหลอมฟิวส์ซิลิกาที่มีสมบัติเหมาะสมต่อการใช้เป็นแบบหล่อกระจกหลอม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 2
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ซิลิกา

ซิลิกา (silica) เป็นวัตถุดิบที่พบได้ในธรรมชาติ เป็นสารประกอบของซิลิคอน และออกซิเจน ซิลิกามีรูปแบบผลึกมากมายหลายชนิด แต่ผลึกแร่ซิลิกาที่มักพบได้โดยทั่วไปมี 3 รูปแบบ ได้แก่ ควอตซ์ (quartz) ไทรดิไมต์ (tridymite) และคริสโตบาไลต์ (cristobalite) การเปลี่ยนแปลงรูปผลึกของซิลิกาจะเกิดขึ้นเมื่อมีการเพิ่มหรือลดอุณหภูมิ และรูปผลึกที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่าจะเรียกว่าแอลฟา (alpha form) รูปผลึกที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงกว่าจะเรียกว่าบีตา (beta form) โดยที่อุณหภูมิห้องแอลฟาควอตซ์เป็นโครงสร้างที่มีความเสถียรมากที่สุด เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจนถึง 573 องศาเซลเซียสแอลฟาควอตซ์จะเปลี่ยนไปเป็นบีตาควอตซ์อย่างรวดเร็ว ทำให้การขยายตัวเชิงปริมาตรเพิ่มขึ้นร้อยละ 0.8 ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงเฟสของไทรดิไมต์เมื่ออุณหภูมิเย็นตัวลงในช่วง 117 ถึง 163 องศาเซลเซียสไทรดิไมต์จะเกิดการเปลี่ยนเฟสจากบีตาไปเป็นแอลฟา ทำให้การขยายตัวเชิงปริมาตรเปลี่ยนแปลงร้อยละ 0.3 และการเปลี่ยนแปลงของเฟสคริสโตบาไลต์เมื่ออุณหภูมิเย็นตัวลงในช่วง 220 ถึง 280 องศาเซลเซียสคริสโตบาไลต์จะเกิดการเปลี่ยนเฟสจากบีตาไปเป็นแอลฟา ทำให้การขยายตัวเชิงปริมาตรเปลี่ยนแปลงร้อยละ 1.5 ซึ่งการเปลี่ยนแปลงลักษณะนี้รูปผลึกจะมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยจากการหมุนตัวของพันธะระหว่างอะตอมของซิลิกอนและออกซิเจน เรียกว่าการเปลี่ยนแปลงแบบอินเวอร์ชัน (inversion) และการเปลี่ยนรูปผลึกจากบีตาควอตซ์ ไปเป็นบีตาไทรดิไมต์และบีตาคริสโตบาไลต์ จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 870 และ 1410 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งจะเกิดขึ้นช้ามาก โดยเป็นการเปลี่ยนแปลงที่มีการเปลี่ยนโครงสร้างอะตอมจากการทำลายพันธะ และใช้พลังงานสูง เรียกการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวนี้ว่า คอนเวอร์ชัน (conversion)[1, 2] การเปลี่ยนแปลงรูปแบบผลึกของซิลิกาแสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การเปลี่ยนแปลงรูปแบบผลึกของซิลิกา[2]

2.2 ฟิวส์ซิลิกา

ฟิวส์ซิลิกา (fused silica) หรือซิลิกาอสัณฐาน (amorphous silica) เป็นซิลิกาที่ไม่มีโครงสร้างผลึก มีการจัดเรียงอะตอมในโครงสร้างอย่างไม่เป็นระเบียบ เป็นซิลิกาที่เกิดจากสิ่งมีชีวิต เช่น ไดอะตอม หรือได้จากการสังเคราะห์โดยการหลอมวัตถุดิบตั้งต้นที่มีซิลิคอนเป็นองค์ประกอบแล้วทำให้เย็นตัวลงกลายเป็นของแข็ง

สมบัติที่สำคัญของฟิวส์ซิลิกา

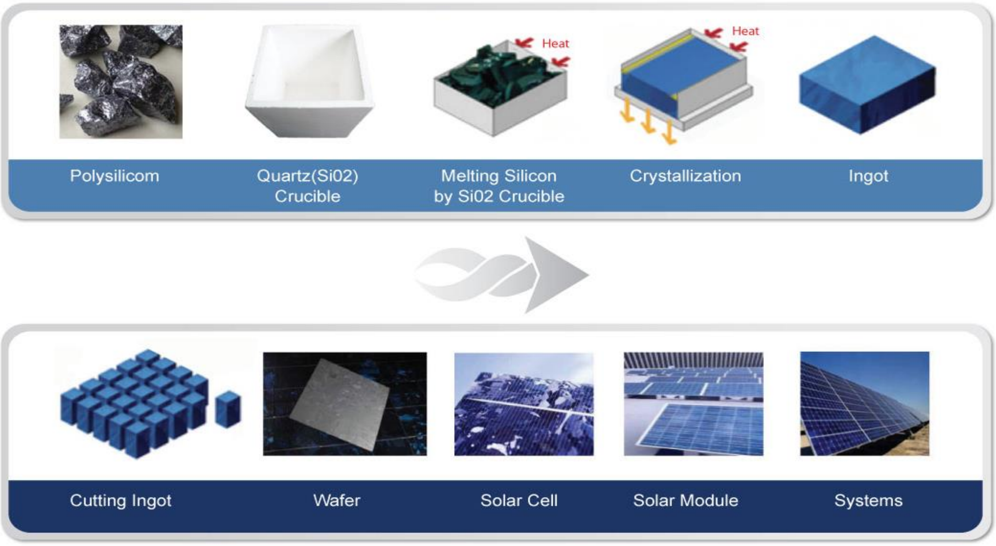
1. มีค่าการขยายตัวเนื่องจากความร้อนที่ต่ำมาก (0.5×10^{-6} $^{o}C^{-1}$)[3]
2. ทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลันได้ดี
3. มีความทนไฟสูง (จุดหลอมตัว 1710 องศาเซลเซียส)[4]
4. มีค่าการนำความร้อนต่ำ (1.38 วัตต์ต่อเมตรเคลวิน)[5]
5. ทนต่อการกัดกร่อนจากปฏิกิริยาเคมีได้เป็นอย่างดี

2.3 กากเบ้าหลอมฟิวส์ซิลิกา

ในกระบวนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์มีการใช้ฟิวส์ซิลิกาเป็นเบ้าหลอม โดยนำผงโลหะซิลิคอนหลอมลงในเบ้าหลอมฟิวส์ซิลิกา เมื่อเย็นตัวลงจะได้แท่งโลหะซิลิคอนซึ่งจะถูกนำไปตัดเพื่อผลิตเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ต่อไป ดังแสดงใน

รูปที่ 2.2 สำหรับกระบวนการผลิตเบ้าหลอมฟิวส์ซิลิกานั้นจะเกิดผลิตภัณฑ์ของเสียเกิดขึ้นระหว่างกระบวนการผลิต แต่ทางโรงงานผู้ผลิตยังไม่มีแนวทางในการนำกากของเสียเหล่านี้กลับมาใช้ใหม่ อย่างไรก็ตามกากเบ้าหลอมฟิวส์ซิลิกาที่เกิดขึ้นนั้นมีองค์ประกอบของซิลิกาที่มีความบริสุทธิ์สูงและมีโครงสร้างอสัณฐานทำให้ไม่เกิดการเปลี่ยนเฟสระหว่างได้รับความร้อนเหมือนซิลิกาที่อยู่ในรูปควอตซ์ มีความทนไฟสูง ทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลันได้เป็นอย่างดี จึงมีแนวคิดที่จะนำกากเบ้าหลอมฟิวส์ซิลิกากลับมาใช้ใหม่ให้เกิดประโยชน์ และช่วยเพิ่มมูลค่าให้กับกากของเสีย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 2.2 กระบวนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์[6]

2.4 กระจกหลอม

กระจกหลอม (Slumped glass) หรือกระจกโค้ง คือกระจกแผ่นที่ถูกทำให้เปลี่ยนรูปร่างโดยการให้ความร้อนจนถึงจุดอ่อนตัวของกระจก (strain temperature) ทำให้กระจกหย่อนตัวลงไปตามความโค้งเว้าของแม่แบบ เรียกกระบวนการผลิตกระจกหลอมนี้ว่าวิธีสลัมปิง (slumping) กระจกหลอมมีการใช้งานกันอย่างแพร่หลาย เช่น กระจกรถยนต์ เลนส์สายตา กระจกที่ใช้ในการประดับตกแต่ง ภาชนะในครัวเรือน เป็นต้น

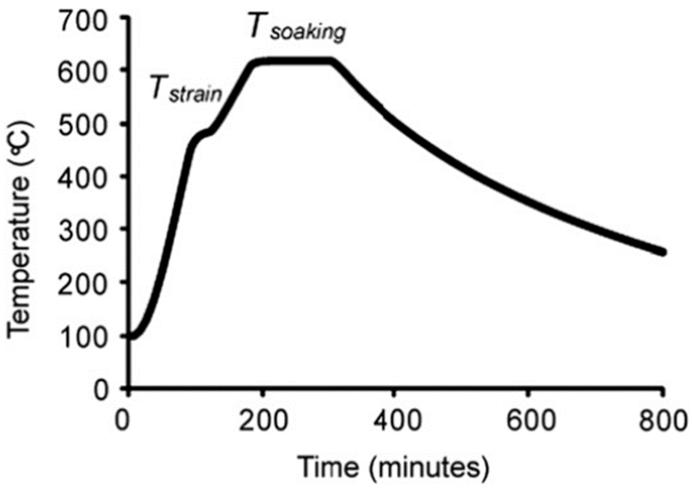
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.4.1 กระบวนการขึ้นรูปกระจกหลอม

กระบวนการขึ้นรูปกระจกหลอมมีขั้นตอนที่แตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับชนิดของกระจก โดยขั้นตอนที่ใช้ทั่วไปคือการให้กระจกแผ่นหย่อนตัวลงตามแม่แบบที่มีรูปร่างที่ต้องการโดยการให้อุณหภูมิจนถึงจุดอ่อนตัวของกระจก ซึ่งรูปแบบการให้ความร้อนในกระบวนการขึ้นรูปกระจกหลอมแสดงในรูปที่ 2.3 และมีกระบวนการขึ้นรูป ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ดังนี้[7-9]

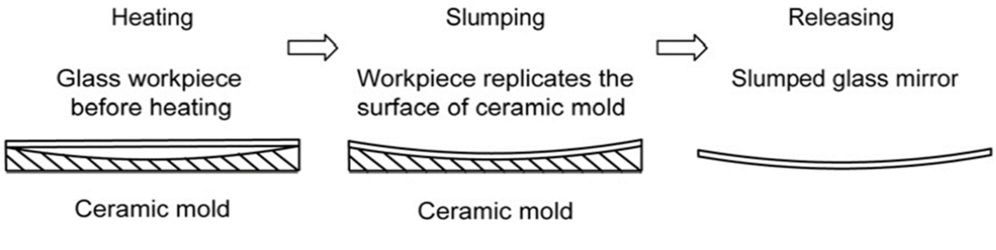
1. นำกระจกแผ่นเรียบวางบนแบบหล่อที่มีรูปร่างโค้งเว้าตามที่ต้องการ
2. นำเข้าเตาอบแล้วเพิ่มอุณหภูมิไปจนถึงประมาณ 500 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณภูมิที่กระจกเริ่มอ่อนตัว แล้วคงอุณหภูมิไว้ระยะเวลาหนึ่งเพื่อให้การกระจายความร้อนสม่ำเสมอทั้งภายในแบบหล่อและกระจก

3. เพิ่มอุณหภูมิอย่างช้า ๆ ไปจนถึงอุณหภูมิประมาณ 600 - 700 องศาเซลเซียส เพื่อให้กระจกอ่อนตัวและหย่อนตัวลงไปตามแบบหล่อรูปทรงต่าง ๆ แล้วคงอุณหภูมิไว้ตามเวลาที่ต้องการ
4. ทำการลดอุณหภูมิลงอย่างรวดเร็วจนถึงอุณหภูมิห้อง เพื่อหลีกเลี่ยงการตกผลึกจนทำให้สูญเสียความมันวาวของกระจก
5. ได้กระจกหลอมที่มีลักษณะโค้งเว้าตามแบบหล่อ



รูปที่ 2.3 การให้ความร้อนในกระบวนการขึ้นรูปกระจกหลอม[7]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.4 กระบวนการขึ้นรูปกระจกหลอม[7]

2.4.2 สมบัติสำคัญของแบบหล่อสำหรับขึ้นรูปกระจกหลอม

จากลักษณะกระบวนการขึ้นรูปกระจกหลอมดังกล่าวจะเห็นได้ว่าสมบัติที่ต้องการสำหรับแบบหล่อที่ใช้ในการขึ้นรูปกระจกหลอม คือจะต้องมีความแข็งแรงและทนความร้อนสูงเพื่อที่จะสามารถรับน้ำหนักของกระจกระหว่างการขึ้นรูปที่อุณหภูมิสูงได้ สามารถตัดแต่ง

เป็นรูปร่างต่าง ๆ ได้ง่าย มีผิวเรียบ นอกจากนี้ในกระบวนการผลิตกระจกหลอม แบบหล่อจะถูกให้ความร้อนสลับกับการลดอุณหภูมิจึงจำเป็นต้องมีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลันได้ดี แต่เนื่องจากการผลิตกระจกหลอมดังกล่าวต้องนำเข้าแบบหล่อวัสดุทนไฟจากต่างประเทศ ซึ่งมีราคาสูง ส่งผลให้มีต้นทุนในการผลิตสูง งานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาเพื่อหาวัตถุดิบอื่นมาทดแทน เพื่อลดต้นทุนการผลิต

ในงานวิจัยของฐิติกาและคณะ[10] ได้ศึกษาสมบัติของตัวอย่างแบบหล่อที่ใช้งานในโรงงานอุตสาหกรรมผลิตกระจกหลอม 3 ตัวอย่าง แสดงดังตารางที่ 2.1 ดังนี้

แบบหล่อที่ 1 มีองค์ประกอบเฟสหลักเป็นซิลิกาอสัณฐาน คริสโตบาไลต์ และควอตซ์ที่ได้จากการเผาดินไดอะตอมไมท์

แบบหล่อที่ 2 มีองค์ประกอบหลักเป็นซิลิกาอสัณฐาน คริสโตบาไลต์ และไพโรฟิลไลต์ที่ได้จากการเผาดินขาวไพโรฟิลไลต์

แบบหล่อที่ 3 มีองค์ประกอบหลักเป็นมุลไลต์ที่ได้จากการเผาส่วนผสมของดินขาวและอะลูมินา

ตารางที่ 2.1 สมบัติของแบบหล่อต่างๆที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมผลิตกระจกหลอม

สมบัติ	แบบหล่อที่ 1	แบบหล่อที่ 2	แบบหล่อที่ 3
องค์ประกอบเฟส	ซิลิกาอสัณฐาน คริสโตบาไลต์ และควอตซ์	ซิลิกาอสัณฐาน คริสโตบาไลต์ และไพโรฟิลไลต์	มุลไลต์
ความหนาแน่น (g/cm^3)	1.12±0.01	1.63±0.01	0.92±0.02
ความพรุนตัว (%)	52.27±0.49	37.65±0.18	65.10±0.80
ความต้านทานต่อแรงกด (MPa)	4.70	9.72	27.32
สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน ($x10^{-6}$ $^{o}C^{-1}$)	3.12	4.50	3.55

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.5 วัสดุทนไฟ

วัสดุทนไฟ (Refractories) คือวัสดุประเภทอนินทรีย์ที่หลอมตัวได้ยากที่อุณหภูมิสูง โดยวัสดุทนไฟจะต้องทนอุณหภูมิได้อย่างน้อย 1500 องศาเซลเซียส นอกจากนี้วัสดุทนไฟยังมีสมบัติทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลันได้ดี มีความแข็งแรงเชิงกลที่ดี ทนต่อการกัดกร่อนและการสึกกร่อนของโลหะหลอมเหลว น้ำแก้ว กากถลุง (slag) และแก๊สร้อนได้เป็นอย่างดี วัสดุทนไฟสามารถจำแนกได้ 2 ประเภท[11, 12] ดังนี้

1. จำแนกตามองค์ประกอบทางเคมี (Chemical classification)

ประเภทของวัสดุทนไฟ	องค์ประกอบทั่วไป	องค์ประกอบหลักทางเคมี
วัสดุทนไฟประเภทกรด (Acid)	ซิลิกา เซอร์โคเนีย	SiO_2 ZrO_2
วัสดุทนไฟประเภทกลาง (Neutral)	อะลูมินา โครม	Al_2O_3 Cr_2O_3
วัสดุทนไฟประเภทด่าง (Basic)	แมกนีเซีย-โครม แมกนีเซีย	$MgO \cdot Cr_2O_3$ MgO

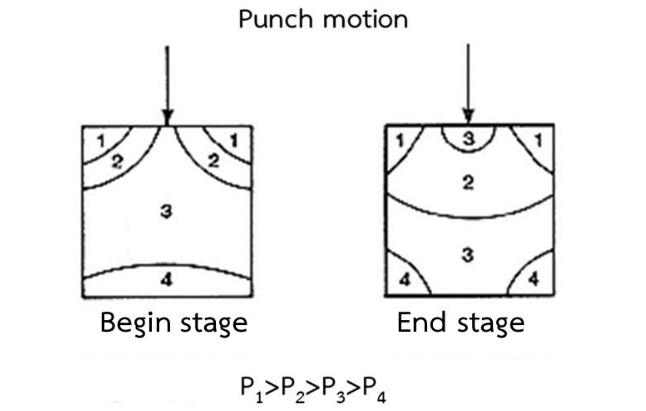
2. จำแนกตามลักษณะการใช้งาน (Physical classification)

ประเภทของวัสดุทนไฟ	ประเภท
วัสดุทนไฟที่มีรูปร่างแน่นอน (shaped refractories)	อิฐทนไฟ อิฐฉนวนทนไฟ
วัสดุทนไฟที่มีรูปร่างไม่แน่นอน (unshaped refractories)	คอนกรีตทนไฟ (castable refractories) ผงตำ (ramming materials) ผงยิง (gunning materials) ปูนทนไฟ (mortar)
เส้นใย (fibrous refractories)	อะลูมิโนซิลิเกตไฟเบอร์ เซอร์โคเนียไฟเบอร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

เนื่องจากวัสดุทนไฟมีหลายชนิด และมีการใช้งานในหลายอุตสาหกรรม ดังนั้นจึงควรเลือกใช้วัสดุทนไฟให้มีองค์ประกอบทางเคมีที่เหมาะสม

การขึ้นรูปวัสดุทนไฟโดยทั่วไปนิยมขึ้นรูปด้วยด้วยเครื่องอัด (mechanical pressing) ซึ่งเป็นกระบวนการขึ้นรูปที่ง่าย และรวดเร็ว แต่สำหรับการขึ้นรูปชิ้นงานที่ตันและมีขนาดใหญ่นั้นการขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดอาจมีข้อจำกัด เนื่องจากเมื่อมีการให้แรงในระหว่างกระบวนการอัดขึ้นรูปอนุภาคบริเวณตรงกลางชิ้นงานจะสามารถเคลื่อนที่ได้ดีกว่าอนุภาคที่อยู่ใกล้กับผนังแม่แบบ ทำให้ความเกิดความแตกต่างกันของความดันที่บริเวณต่าง ๆ ของชิ้นงาน แสดงดังรูปที่ 2.5 โดยบริเวณที่มุมหรือขอบของชิ้นงานจะได้รับแรงดันมากที่สุด ทำให้ในบริเวณดังกล่าวมีการเกาะตัวของอนุภาคดีกว่าบริเวณตรงกลางชิ้นงานส่งผลให้ชิ้นงานขนาดใหญ่เกิดรอยแตกร้าวบริเวณตรงกลางของชิ้นงานเมื่อถอนแรงออก



รูปที่ 2.5 ความแตกต่างของความดันที่บริเวณต่าง ๆ ของชิ้นงานในการขึ้นรูปแบบอัด[13]

จากสมบัติของฟิวส์ซิลิกาที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.2 ฟิวส์ซิลิกาเป็นวัสดุชนิดหนึ่งที่เหมาะสมกับการนำไปใช้เป็นแบบหล่อสำหรับขึ้นรูปกระจกหลอม เนื่องจากฟิวส์ซิลิกามีสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนที่ต่ำมาก (0.5×10^{-6} $°C^{-1}$)[3] ทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลันได้ดีเยี่ยม และมีองค์ประกอบทางเคมีใกล้เคียงกับกระจกทำให้ช่วยลดการปนเปื้อนบนผิวของกระจกหลอม อย่างไรก็ตามการขึ้นรูปเซรามิกซิลิกาพรุนจำเป็นต้องขึ้นรูปเป็นชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่จึงไม่สามารถขึ้นรูปด้วยวิธีอัดแห้งได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะศึกษาการขึ้นรูปแม่แบบซิลิกาพรุนด้วยวิธีการหล่อแบบ โดยสามารถควบคุมความพรุนตัวของชิ้นงานได้จากการควบคุมอัตราส่วนของน้ำต่อวัตถุดิบ

2.6 ตัวเชื่อมประสาน

การขึ้นรูปฟิวส์ซิลิกาด้วยวิธีหล่อแบบมีหลายเทคนิค เช่น การหล่อแบบเจล (gel casting)[14] การหล่อแบบที่จุดเยือกแข็ง (freeze-casting)[15] การหล่อแบบโฟม (foam casting)[16] แต่เนื่องจากกระบวนการดังกล่าวมีการใช้เครื่องมือที่มีความซับซ้อน ราคาแพง และสารตั้งต้นมีความเป็นพิษ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงสนใจเลือกใช้เทคนิคการหล่อแบบในการขึ้นรูปแบบหล่อสำหรับผลิตกระจกหลอมโดยการเติมตัวเชื่อมประสาน ซึ่งชนิดของตัวเชื่อมประสานที่ใช้ในการขึ้นรูปจะส่งผลอย่างมากต่อสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมได้ โดยตัวเชื่อมประสานที่สนใจศึกษา แบ่งเป็น 2 ประเภทหลักๆ คือ ตัวเชื่อมประสานอนินทรีย์ (inorganic binder) ได้แก่ ปูนซีเมนต์อะลูมินาสูง (high-alumina cement, calcium aluminate cement) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาว (white portland cement) และตัวเชื่อมประสานอินทรีย์ (organic binder) ได้แก่ แป้งข้าวเหนียว (glutinous rice flour)

ปูนซีเมนต์อะลูมินาสูงเป็นปูนที่นิยมใช้เป็นตัวเชื่อมประสานในคอนกรีตทนไฟ (castable)[19] เนื่องจากสามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงและขึ้นรูปได้ง่าย โดยเมื่อผสมปูนซีเมนต์อะลูมินาสูงกับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน และทำให้ชิ้นงานแข็งตัวสามารถถอดแบบได้ภายใน 24 ชั่วโมง สำหรับ

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาว สามารถแข็งตัวและถอดแบบชิ้นงานได้ภายใน 24 ชั่วโมงเช่นเดียวกันกับปูนซีเมนต์อะลูมินาสูง ทำให้ง่ายต่อการขึ้นรูป และขั้นตอนการผลิตไม่ซับซ้อน นอกจากนี้ปูนซีเมนปอร์ตแลนด์ขาวยังสามารถหาได้ง่าย ราคาถูก สามารถใช้เป็นตัวเชื่อมประสานในการเตรียมมอร์ตาร์ทนไฟ[10, 18] และมีความทนไฟเพียงพอที่สามารถใช้เป็นตัวเชื่อมประสานเพื่อเตรียมแบบหล่อสำหรับกระจกหลอม

อย่างไรก็ตามตัวเชื่อมประสานอินทรีย์ที่กล่าวมานั้นเมื่อทำการเผาแล้วจะยังคงเหลืออยู่ในชิ้นงาน ซึ่งอาจส่งผลเสียต่อสมบัติทางความร้อนของชิ้นงานที่เตรียมได้ ในงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาตัวเชื่อมประสานอนินทรีย์ ได้แก่ แป้งข้าวเหนียว มาใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงานเซรามิกซิลิกาพรุน โดยอาศัยหลักการเกิดเจลของแป้งเพื่อช่วยในการขึ้นรูปชิ้นงานและเมื่อเผาที่อุณหภูมิสูงกว่า 600 องศาเซลเซียส แป้งจะสลายตัวอย่างสมบูรณ์ไม่ทิ้งสิ่งเจือปนไว้ในชิ้นงาน ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความบริสุทธิ์สูง และยังคงสมบัติที่ดีของวัตถุดิบไว้ นอกจากนี้ยังเป็นตัวเชื่อมประสานที่ทำให้เกิดรูพรุนกับชิ้นงานมากขึ้นด้วย

2.6.1 ปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานที่ให้ความแข็งแรงกับคอนกรีต มีราคาไม่แพงเนื่องจากผลิตจากวัตถุดิบที่มีอยู่ในธรรมชาติ เช่น หินปูน (limestone) หินชอล์ก (chalk) ซึ่งให้ออกไซด์ของธาตุแคลเซียม ดินเหนียว หินเชลหรือหินดินดาน (shale) หินชนวน (slate) ซึ่งให้ออกไซด์ของธาตุซิลิกอนและอะลูมิเนียม โดยสมบัติของปูนซีเมนต์ขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาในการเผาส่วนประกอบของวัตถุดิบต่าง ๆ และกระบวนการผลิต

สารประกอบหลักของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประกอบด้วยออกไซด์หลัก ได้แก่ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ซิลิกา (SiO_2) อะลูมินา (Al_2O_3) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) ส่วนออกไซด์รอง ได้แก่ แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ออกไซด์ของแอลคาไล (Na_2O และ K_2O) และซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) โดยออกไซด์เหล่านี้จะทำปฏิกิริยาและรวมตัวกันอยู่ในรูปสารประกอบที่สำคัญ 4 อย่างคือ

1. ไตรแคลเซียมซิลิเกต (tricalcium silicate, $3CaO{\cdot}SiO_2$, C_3S)

   C_3S มีปริมาณมากที่สุดในปูนซีเมนต์ร้อยละ 45 ถึง 55 เมื่อผสม C_3S กับน้ำ C_3S จะละลายเกิดแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) และไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) อย่างรวดเร็วทำให้เกิดความร้อนขึ้นในระยะแรก โดยปฏิกิริยาในระยะแรกจะลดลงอย่างรวดเร็วทำให้ปูนซีเมนต์ในช่วงนี้อยู่ในสภาพพลาสติกสามารถเทหรือหล่อแบบได้ เมื่อความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนและไฮดรอกไซด์ไอออนสูงพอจะทำให้เกิดการตกผลึกของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (calcium hydroxide, $Ca(OH)_2$, CH) และเริ่มเกิดปฏิกิริยาอย่างรวดเร็ว

อีกครั้ง เกิดเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (calcium silicate hydrate, $3CaO{\cdot}2SiO_2{\cdot}3H_2O$, CSH) ที่บริเวณผิวของ C_3S ปูนซีเมนต์จะเริ่มแข็งตัวและมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ซึ่งปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่าง C_3S กับน้ำแสดงดังสมการที่ (2.1)

$$2(3CaO{\cdot}SiO_2) + 6H_2O \longrightarrow 3CaO{\cdot}2SiO_2{\cdot}3H_2O + 3\ Ca(OH)_2$$

$$2C_3S \quad + \quad 6H \longrightarrow C_3S_2H_3 \quad + \quad 3CH \qquad (2.1)$$

2. ไดแคลเซียมซิลิเกต (dicalcium silicate, $2CaO{\cdot}SiO_2$, C_2S)

C_2S มีอยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประมาณร้อยละ 15 ถึง 35 C_2S ทำปฏิกิริยาเช่นเดียวกับ C_3S แต่ปฏิกิริยาจะเกิดช้ากว่า ความร้อนจากปฏิกิริยาจึงน้อยกว่า ปฏิกิริยาระหว่าง C_2S กับน้ำแสดงดังสมการที่ (2.2)

$$2(2CaO{\cdot}SiO_2) + 4H_2O \longrightarrow 3CaO{\cdot}2SiO_2{\cdot}3H_2O + Ca(OH)_2$$

$$2C_2S \quad + \quad 4H \longrightarrow C_3S_2H_3 \quad + \quad CH \qquad (2.2)$$

3. ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (tricalcium aluminate, $3CaO{\cdot}Al_2O_3$, C_3A)

C_3A มีอยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประมาณร้อยละ 7 ถึง 15 ทำปฏิกิริยากับน้ำอย่างรวดเร็วและเพสต์ก่อตัวในทันที ได้แคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต (calcium alumunate hydrate, CAH) แสดงดังสมการที่ (2.3)

$$3CaO{\cdot}Al_2O_3 + 6H_2O \longrightarrow 3CaO{\cdot}Al_2O_3{\cdot}6H_2O$$

$$C_3A \quad + 6H \longrightarrow C_3AH_6 \qquad (2.3)$$

เนื่องจากปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว จึงต้องใส่ตัวหน่วงปฏิกิริยา คือ ยิปซัม เมื่อ C_3A ทำปฏิกิริยากับซัลเฟตไอออนจะได้แคลเซียมซัลโฟอะลูมิเนตไฮเดรต (calcium sulfoaluminate hydrate, $6CaO{\cdot}Al_2O_3{\cdot}3SO_3{\cdot}32H_2O$) หรือเรียกว่าเอททริงไกด์ (ettringite) เมื่อเอททริงไกด์มีปริมาณมากขึ้นรอบๆ C_3A ทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นช้าลง และเมื่อซัลเฟตไอออนทำปฏิกิริยาหมดแล้ว C_3A จะทำปฏิกิริยากับเอททริงไกด์เกิดเป็นแคลเซียมโมโนซัลโฟอะลูเมตจะเกิดสารละลายของแข็งขึ้น

4. เตตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์โรต์ (tetracalcium alumino ferrite, $4CaO{\cdot}Al_2O_3{\cdot}Fe_2O_3$, C_4AF)

C_4AF มีอยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประมาณร้อยละ 5 ถึง 10 ปฏิกิริยาของ C_4AF คล้ายกับ C_3A แต่จะเกิดช้ากว่าและมีความร้อนน้อยกว่า

ผลผลิตของปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์กับน้ำ โดยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วช่วงแรก ปฏิกิริยาจะช้าลงเนื่องจากเกิดชั้นของเอททริงไกด์ และความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นของไอออนของแคลซียมและไฮดรอกไซด์ เมื่อความเข้มข้นของสารละลายสูงพอ CH จะตกผลึก และปฏิกิริยาของ C_3S และ C_2S เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วอีกครั้ง เกิดเป็น CSH ตามด้วย

ปฏิกิริยาของ C_3A และ C_4AF แคลเซียมซิลิเกตที่เป็นองค์ประกอบหลักจะเกิดปฏิกิริยาต่อทำให้เกิด CSH มากขึ้นจะเชื่อมโยงถึงกันและเกิดการยึดเกาะกันขึ้น[17]

2.6.2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาว (white portland cement)

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวเป็นปูนซีเมนต์ที่มีเฟสหลัก คือ C_2S และ C_3S เมื่อผสมกับน้ำจะเกิดการแข็งตัวขึ้นเนื่องจากเกิดแคลเซียมไฮโดรซิลิเกตเกิดขึ้น ทำให้เกิดการแข็งตัวที่อุณหภูมิห้อง การผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวอาจมีการเติม ดินขาว ดินสอพอง หรือหินปูนเพื่อลดปริมาณจากออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส โดยทั่วไปแล้วจะกำหนดให้ออกไซด์ของเหล็กในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวต่ำกว่าร้อยละ 0.5 ซึ่งทำให้ปริมาณสารเฟอร์ไรต์ในปูนซีเมนต์มีประมาณร้อยละ 0.5 เท่านั้น ดังนั้นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวจึงมีส่วนประกอบของ C_3A สูง และแทบจะไม่มี C_4AF ปูนซีเมนต์ชนิดนี้เหมาะกับงานที่ต้องการความสวยงามหรือทางด้านสถาปัตยกรรม

นิธิวัชร์ นวอัครฐานันท์ และคณะ[18] ได้เตรียมมอร์ตาร์ทนไฟที่มีความพรุนตัวสูงจากดินโดโลไมต์ ทรายบด แคลไซน์อะลูมินา และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวเป็นตัวเชื่อมประสาน ในอัตราส่วนร้อยละ 36.31:16.66:28.40:18.63 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ โดยขึ้นรูปด้วยวิธีการหล่อแบบแล้วทิ้งไว้ให้แข็งตัวที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ขาวกับน้ำ ทำให้ชิ้นงานก่อนเผามีความแข็งแรง ร่วมกับเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกตร้อยละ 0.185 โดยน้ำหนักของวัตถุดิบ ดิสเป็กซ์ (dispex) ร้อยละ 0.05 เมลฟลักซ์ (melflux) ร้อยละ 0.5 และ วีนนาพาส (vinnapas) ร้อยละ 1 โดยน้ำหนักของวัตถุดิบ เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียส ยืนไฟเป็นเวลา 1 ชั่วโมง สามารถขึ้นรูปชิ้นงานแบบหล่อขนาดใหญ่ประมาณ 1 ฟุต ได้โดยไม่พบรอยแตกร้าวที่ผิวของชิ้นงาน ดังรูปที่ 2.6 พบว่าชิ้นงานที่เตรียมได้มีค่าสัมประสิทธิ์ การขยายตัวเนื่องจากความร้อน 6.59×10^{-6} ต่อองศาเซลเซียส ความหนาแน่น 1.53 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ความพรุนตัวร้อยละ 48.04 ความต้านทานต่อแรงกด 16.45 เมกะพาสคัล แต่จากการทดสอบความทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลันโดยให้อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที เกิดการแตกร้าวของชิ้นงานเกิดขึ้น

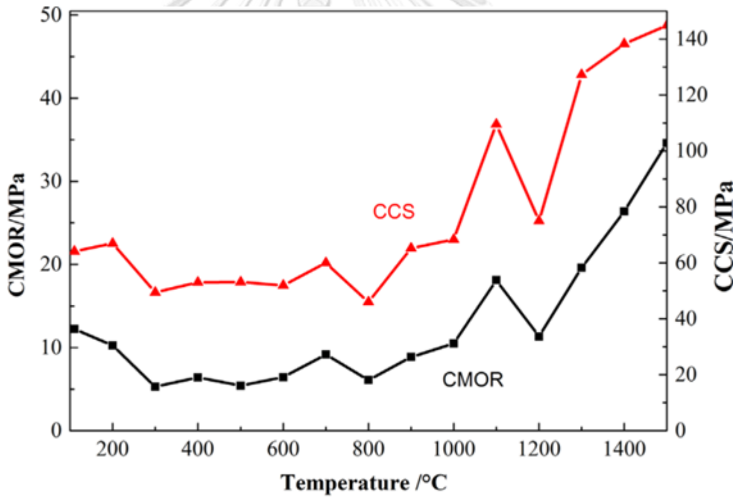
รูปที่ 2.6 ชิ้นงานขนาดใหญ่เผาที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง[18]

2.6.3 ปูนซีเมนต์อะลูมินาสูง (high alumina cement)

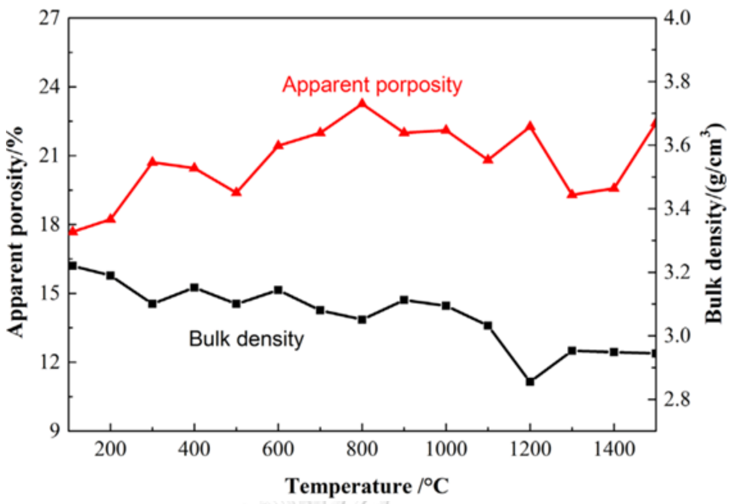
ปูนซีเมนต์อะลูมินาสูง เป็นปูนซีเมนต์ที่ได้จากการเผาส่วนผสมของอะลูมินา (alumina) บอกไซต์ (bauxite) และหินปูน ที่อุณหภูมิประมาณ 1450 องศาเซลเซียส แล้วบดเมื่อเม็ดปูนเย็นตัวลง ซึ่งเฟสหลักที่เกิดขึ้น ได้แก่ $CaO{\cdot}Al_2O_3$ (CA) และเฟสรอง ได้แก่ $CaO{\cdot}2Al_2O_3$ (CA_2) และ $12CaO{\cdot}7Al_2O_3$ ($C_{12}A_7$) เมื่อผสมกับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ปูนซีเมนต์ชนิดนี้จะมีกำลังสูงเมื่อบ่มไว้อย่างน้อย 24 ชั่วโมง และมีความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันสูงและรวดเร็ว นอกจากนี้ปูนซีเมนต์อะลูมินาสูงยังทนทานต่อการกัดกร่อนของซัลเฟตได้ดี นิยมใช้เป็นตัวเชื่อมประสานในคอนกรีตทนไฟ[19] แต่ที่อุณหภูมิสูงและความชื้นสูงความแข็งแรงจะลดลงเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบอะลูมิเนต

Y. Wang และคณะ[20] ศึกษาการเตรียมวัสดุทนไฟอะลูมินา โดยใช้ปูนซีเมนต์อะลูมินาสูงเป็นตัวเชื่อมประสานร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ปั่นผสมเป็นเวลา 3 นาที จากนั้นเทลงแบบหล่อแล้วใช้แรงสั่นเพื่อให้ไหลเข้าสู่แม่แบบ ตั้งทิ้งไว้ให้ก่อตัวที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ถอดแบบและนำชิ้นงานไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส ศึกษาสมบัติต่างๆในช่วงอุณหภูมิ 110 – 1500 องศาเซลเซียสดังรูปที่ 2.7 และรูปที่ 2.8 พบว่าที่อุณหภูมิช่วง 110 – 800 องศาเซลเซียส เกิดการสลายตัวของเฟสที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบ (hydrate phase) ส่งผลให้ค่าความต้านทานต่อแรงกดและความต้านทานต่อแรงดัดลดลง จาก 60

เมกะพาสคัลที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียสไปเป็น 49 เมกะพาสคัล และจาก 13 เมกะพาสคัลไปเป็น 6 เมกะพาสคัล ตามลำดับ ในขณะที่ค่าความพรุนตัวสูงขึ้นจากร้อยละ 18 ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียสไปเป็นร้อยละ 23 และค่าความหนาแน่นลดลงจาก 3.2 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ไปเป็น 3.15 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ในช่วงอุณหภูมิ 900 ถึง 1100 องศาเซลเซียส เกิดการตกผลึกของ CA จากการทำปฏิกิริยาของ $C_{12}A_7$ กับ Al_2O_3 ทำให้ค่าความต้านทานต่อแรงกดและความต้านทานต่อแรงดัดเพิ่มขึ้นเป็น 110 เมกะพาสคัล และ 17 เมกะพาสคัล ที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึง 1200 องศาเซลเซียส เกิดเฟสของ CA_2 ขึ้น ทำให้การขยายตัวเชิงปริมาตรเพิ่มขึ้น ส่งผลต่อค่าความต้านทานต่อแรงกดและความต้านทานต่อแรงดัดลดลงอย่างรวดเร็วไปเป็น 75 เมกะพาสคัล และ 10 เมกะพาสคัล ตามลำดับ สำหรับอุณหภูมิ 1300 องศาเซลเซียส ไปจนถึง 1500 องศาเซลเซียส เริ่มเกิดการเผาผนึกของชิ้นงานทำให้สมบัติเชิงกลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.7 สมบัติเชิงกลของวัสดุทนไฟอะลูมินาที่อุณหภูมิ 110 ถึง 1500 องศาเซลเซียส[20]

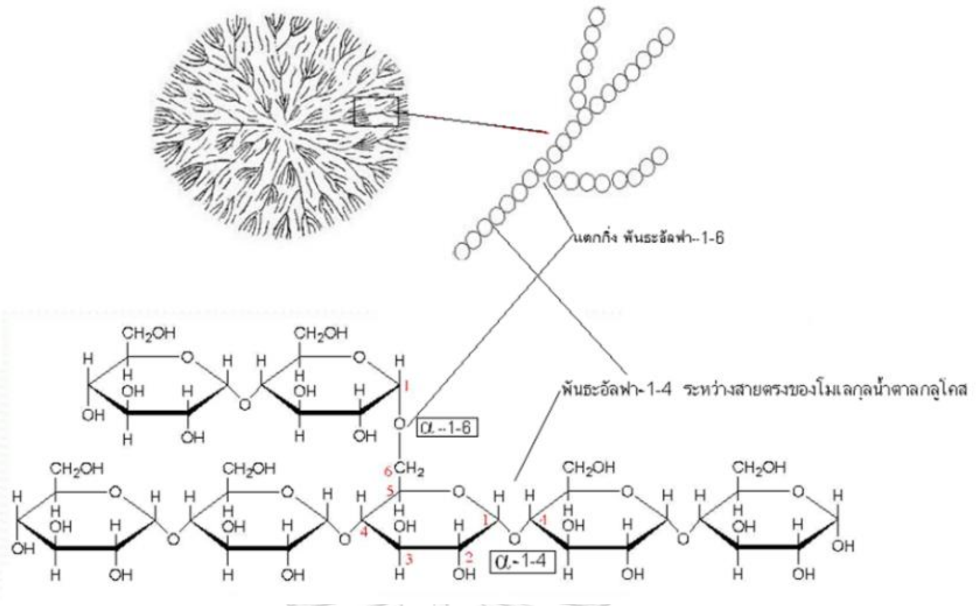


รูปที่ 2.8 ความหนาแน่นและความพรุนตัวของวัสดุทนไฟอะลูมินา ที่อุณหภูมิ 110 ถึง 1500 องศาเซลเซียส[20]

2.6.4 แป้ง (starch)

แป้งเป็นโพลิเมอร์ของกลูโคสมีสูตรทั่วไปคือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ โมเลกุลแป้งแบ่งออกเป็น 2 ชนิดหลักๆ คืออะไมโลส (amylose) ซึ่งเป็นโมเลกุลขนาดเล็กเชื่อมต่อกันที่ตำหน่งแอลฟา 1,4 มีโครงสร้างแบบเส้นตรง (linear) และอะไมโลเพคตินซึ่งเป็นโมเลกุลขนาดใหญ่ (amylopectin) เชื่อมต่อกันที่ตำแหน่งแอลฟา 1,4 และแอลฟา 1,6 มีโครงสร้างแบบกิ่ง (branch)[21] แสดงดังรูปที่ 2.9

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

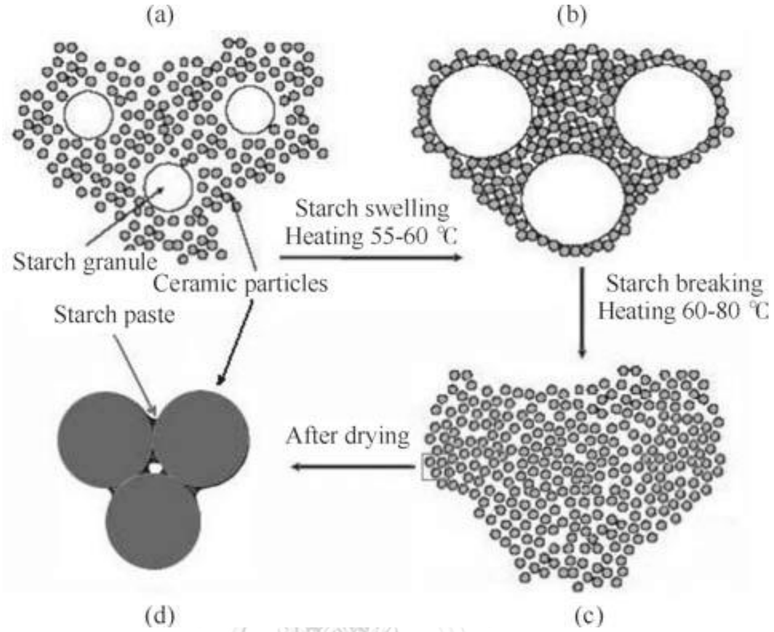


รูปที่ 2.9 โครงสร้างของอะไมโลสและอะไมโลเพคติน[22]

เม็ดแป้งมีโครงสร้างแบบกึ่งผลึก (semi-crystalline) ประกอบด้วยส่วนที่เป็นอสัณฐานและส่วนที่เป็นผลึก ซึ่งเกิดจากการเรียงตัวของอะไมโลสและอะไมโลเพคติน โดยส่วนที่เป็นผลึกนี้เกิดจากอะไมโลเพคตินแต่ละโมเลกุลเชื่อมกันเป็นร่างแหสามมิติด้วยพันธะไฮโดรเจน ทำให้เกิดโครงสร้างที่เป็นผลึกที่มีความแข็งแรง ซึ่งความแข็งแรงขึ้นอยู่กับจำนวนโมเลกุลที่มาเชื่อมต่อกันและการจัดเรียงโมเลกุลของเม็ดแป้ง และส่วนที่เป็นอสัญฐานเกิดจากบริเวณที่เป็นจุดเชื่อมกิ่ง (branch point) ของอะไมโลเพคตินและอะไมโลสที่มีการจัดเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ[23, 24]

แป้งเป็นวัตถุดิบอีกชนิดหนึ่งที่ใช้ในการทำให้เกิดรูพรุนขึ้นในเซรามิก[25-27] เนื่องมาจากองค์ประกอบหลักของแป้งคือ คาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน สามารถสลายตัวที่อุณหภูมิสูง นอกจากนี้ยังมีการใช้แป้งเป็นตัวก่อเจลให้กับสเลอรีเซรามิกภายใต้อุณหภูมิที่เหมาะสม เรียกว่า กระบวนการสตาร์ชคอนโซลิเดชัน (starch consolidation) โดยการเตรียมชิ้นงานสามารถทำได้โดยนำผงเซรามิก น้ำ และแป้งมาผสมรวมกันเป็นสารแขวนลอย แล้วเทลงแม่แบบ เมื่อให้ความร้อนในช่วง 60 - 80 องศาเซลเซียส ส่วนอสัณฐานของแป้งจะจับกับน้ำได้มากขึ้น และการจับกันของโมเลกุลในส่วนของผลึกจะเริ่มคลายความหนาแน่นลง โมเลกุลส่วนที่เริ่มคลายตัวออกจากกันจับกับน้ำทำให้เม็ดแป้งพองตัวเพิ่มขึ้น แป้งจะดูดน้ำแล้วพองออก (swell) จนกระทั่งเกิดเจล (gelatinization) และทำให้สารละลายแป้งมีความหนืดและความใสเพิ่มขึ้น เมื่อชิ้นงานแข็งตัวอนุภาคของเซรามิกจะเกิดการเชื่อม

ประสานกัน[28-30] ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ในผลิตภัณฑ์เซรามิกมีการเตรียมด้วยวิธีสตาร์ชคอนโซลิเดชัน โดยใช้แป้งหลายชนิด เช่น แป้งมันฝรั่ง (potato starch)[21] แป้งมันสำปะหลัง (tapioca starch)[31] แป้งข้าวโพด (corn starch)[32] เป็นต้น



รูปที่ 2.10 กระบวนการสตาร์ชคอนโซลิเดชัน[31]

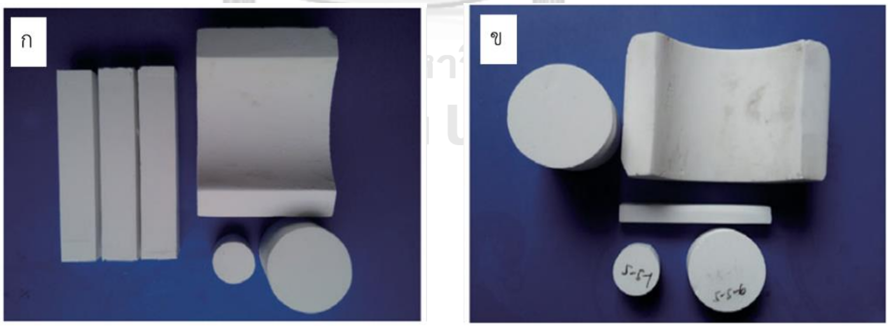
2.6.5 แป้งข้าวเหนียว (glutinous rice flour)

เนื่องจากแป้งต่างชนิดกันจะมีองค์ประกอบของอะไมโลส และอะไมโลเพคติน ที่แตกต่างกัน ทำให้อัตราการพองของอนุภาคแป้ง และอุณหภูมิที่เริ่มเกิดเจลแตกต่างกัน ดังตารางที่ 2.2[33] จะพบว่าแป้งที่มีปริมาณอะไมโลเพคตินมากจะทำให้แป้งดูดน้ำแล้วพองออกจนกระทั่งเกิดเจลได้เร็ว นอกจากนี้แป้งที่มีปริมาณอะไมโลเพคตินมากจะส่งผลให้ความแข็งแรงของชิ้นงานก่อนเผามีความแข็งแรงสูงกว่าแป้งที่มีปริมาณอะไมโลเพคตินน้อย จากงานวิจัยของคฑามาศ นาคกลัดและคณะ[34] พบว่าแป้งข้าวเหนียวมีความแข็งแรงต่อแรงดัดก่อนเผาสูงสุด 3.15 เมกะพาสคัล รองลงมาคือชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยแป้งมันสัมปะหลัง และชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยแป้งข้าวโพด มีค่าความแข็งแรงต่อแรงดัดก่อนเผา เท่ากับ 3.10 เมกะพาสคัล และ 0.80 เมกะพาสคัล ตามลำดับ สำหรับแป้งข้าวเหนียวมีอะไมเพคตินอยู่ประมาณร้อยละ 98[35] ดังนั้นจึงสนใจที่จะนำแป้งข้าวเหนียวมาใช้เป็นตัวเชื่อมประสาน

ตารางที่ 2.2 ลักษณะเฉพาะของแป้งแต่ละชนิด[33]

ชนิดของแป้ง	ปริมาณอะไมโลส (%)	ปริมาณอะไมโลเพคติน (%)	อัตราการพองออกของอนุภาคแป้ง	อุณหภูมิที่เริ่มเกิดเจล (°C)
แป้งมันฝรั่ง	20-21	79-80	เร็ว	50-56
แป้งข้าวสาลี	25-30	70-75	ช้า	58
แป้งมันสำปะหลัง	16-17	83-84	เร็ว	49
แป้งข้าวโพด	25-28	72-75	ช้า	62
แป้งข้าวจ้าว	17-30	70-83	ช้า	58-69
แป้งข้าวเหนียว	0-2	98-100	เร็ว	65-70

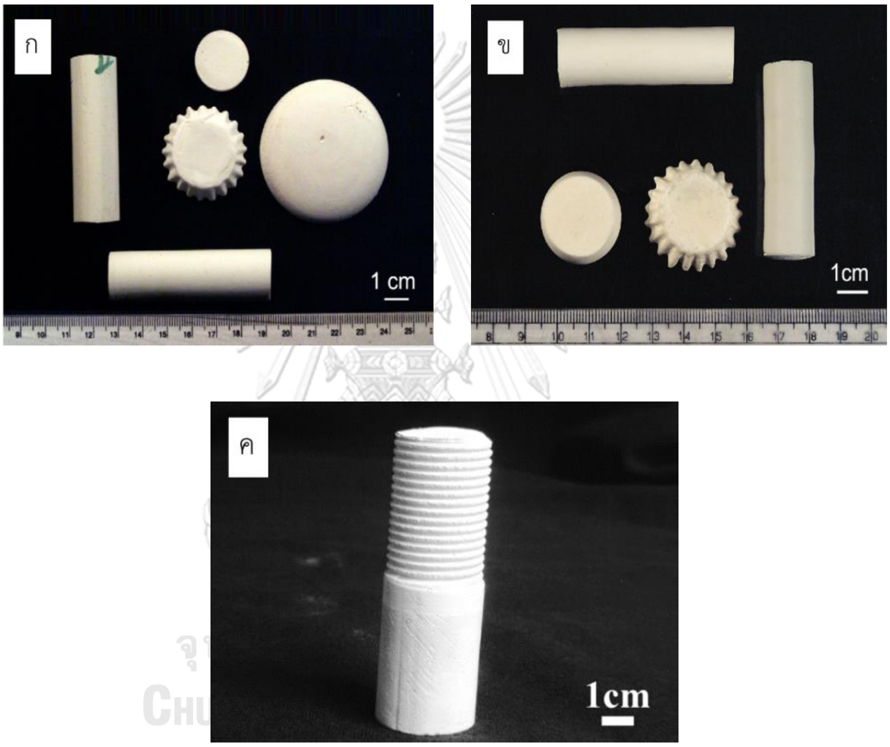
W. Wan และคณะ[35] สามารถเตรียมฟิวส์ซิลิกาเซรามิกที่มีความหนาแน่นสูงโดยใช้แป้งข้าวเหนียวเป็นตัวเชื่อมประสานได้ โดยทำการปั่นผสมแล้วให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียสเพื่อให้เกิดเจล เมื่อชิ้นงานแห้งทำการถอดแบบ และเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1275 องศาเซลเซียส ได้ชิ้นงานแสดงดังรูปที่ 2.11 พบว่าเมื่อเติมแป้งข้าวเหนียวร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก มีความแข็งแรงต่อแรงดัดสูงที่สุด (flexural strength) 47.02 เมกะพาสคัล และความหนาแน่น 1.75 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งมีประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงกับการเตรียมเซรามิกที่มีความหนาแน่นสูงด้วยการใช้สารก่อเจลที่มีความเป็นพิษตัวอื่นๆ



รูปที่ 2.11 (ก) ชิ้นงานก่อนเผา (ข) ชิ้นงานหลังเผาที่อุณหภูมิ 1275 องศาเซลเซียส[35]

J. Chandradass และคณะ[36] สามารถเตรียมอะลูมินาที่มีความหนาแน่นสูงโดยใช้แป้งข้าวเจ้าเป็นตัวเชื่อมประสาน ด้วยกระบวนการสตาร์ชคอนโซลิเดชัน โดยนำผงอะลูมินาที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 0.4 ไมครอน แป้งข้าวเจ้า และสารช่วยกระจายลอยตัว (Darvan C) ผสมกับน้ำกลั่นด้วยปริมาณผงต่อน้ำร้อยละ 60 โดยปริมาตร แล้วนำมาบดผสมด้วยหม้อบด

เป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นเทลงแม่แบบที่ไม่มีรูพรุน แล้วอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อให้เกิดเจล นำชิ้นงานที่ถอดออกจากแม่แบบมาอบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง มาเผาที่อุณหภูมิ 1600 องศาเซลเซียสโดยมีอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง พบว่าปริมาณแป้งข้าวเจ้าร้อยละ 2.5 โดยน้ำหนัก ทำให้ชิ้นงานมีความหนาแน่นเชิงทฤษฎีสูงสุดร้อยละ 99.4 และมีค่าความแข็งแรงต่อแรงดัดสูงสุดเท่ากับ 247 เมกะพาสคัล ซึ่งชิ้นงานอะลูมินาที่เตรียมได้แสดงดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 (ก) ชิ้นงานก่อนเผา (ข) ชิ้นงานหลังเผา (ค) ชิ้นงานหลังเผาที่ผ่านการตกแต่งที่อุณหภูมิ 1600 องศาเซลเซียส[36]

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงวัตถุดิบ สารเคมี อุปกรณ์ และขั้นตอนในการเตรียมเซรามิกซิลิกาพรุนจากกากเบ้าหลอมฟิวส์ซิลิกา รวมถึงวิธีการวิเคราะห์และทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของชิ้นงาน

3.1 วัตถุดิบ สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 วัตถุดิบและสารเคมี

ในงานวิจัยนี้ได้นำกากเบ้าหลอมฟิวส์ซิลิกาที่ผ่านการบดและผ่านตะแกรงร่อนขนาด 325 เมช (Italian-Thai Ceramic Refractory Co., Ltd.) มาเตรียมเซรามิกซิลิกาพรุน โดยตัวเชื่อมประสานที่สนใจศึกษาแบ่งออกเป็น ตัวเชื่อมประสานอนินทรีย์ ได้แก่ ปูนซีเมนต์อะลูมินาสูง (CA-25R, ALMATIS, Germany) และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาว (Siam cement group, Thailand) ตัวเชื่อมประสานอินทรีย์ ได้แก่ แป้งข้าวเหนียว (Thai wah Pub Co., Ltd, Thailand)

3.2 ขั้นตอนการวิจัย

3.2.1 การวิเคราะห์วัตถุดิบ

3.2.1.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ

ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบด้วยเทคนิค Wavelength dispersive X-ray fluorescence spectrometry ด้วยเครื่อง X-ray fluorescence spectrometer (Bruker รุ่น S8 Tiger)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

3.2.1.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสของวัตถุดิบ

ศึกษาองค์ประกอบเฟสของวัตถุดิบด้วยเทคนิค X-ray diffractometry ด้วยเครื่อง X-ray Diffractometer (Bruker รุ่น D8 Advanced) โดยใช้ Cu-K_{α} radiation ทำการวัดที่ 0.01 องศา (Step Size) ต่อ 1 วินาที (Step Time) ในช่วง 2-Theta เท่ากับ 10 ถึง 80 องศา

3.2.1.3 การวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของวัตถุดิบ

ศึกษาขนาดของผงวัตถุดิบด้วยเทคนิค Dynamic Light Scattering ด้วยเครื่อง Particle Size Distribution Analyzer (Malvern Instrument รุ่น Mastersizer 2000)

3.2.2 การเตรียมและศึกษาอัตราส่วนของตัวเชื่อมประสานชนิดต่าง ๆ ที่เหมาะสมกับการขึ้นรูปด้วยวิธีหล่อแบบ

3.2.2.1 ตัวเชื่อมประสานอนินทรีย์

ศึกษาการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของตัวเชื่อมประสานอนินทรีย์ ได้แก่ ปูนซีเมนต์อะลูมินาสูง และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาว โดยนำกากเบ้าหลอมฟิวส์ซิลิกา มาขึ้นรูปด้วยวิธีการหล่อแบบ โดยมีขั้นตอนการผสมและขึ้นรูปดังนี้

1. นำฟิวส์ซิลิกาผสมกับน้ำกลั่น และกวนผสมด้วยเครื่องปั่นผสมแบบใบพัด
2. เติมตัวเชื่อมประสานอนินทรีย์ โดยปริมาณส่วนผสมที่ใช้แสดงดังตารางที่ 3.1
    - สำหรับชิ้นงานที่เตรียมโดยใช้ปูนซีเมนต์อะลูมินาสูงเป็นตัวเชื่อมประสานมีการเติมลิเทียมคาร์บอเนตร้อยละ 1 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ เพื่อช่วยในการก่อตัวของปูนซีเมนต์
    - สำหรับชิ้นงานที่เตรียมโดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวเป็นตัวเชื่อมประสานมีการเติมวีนนาพาสร้อยละ 2 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ เพื่อช่วยลดการหดตัวในขณะที่ปูนซีเมนต์แห้งตัว

ตารางที่ 3.1 ปริมาณส่วนผสมที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่าง

สูตร	ตัวเชื่อมประสาน	ผงฟิวส์ซิลิกา : ตัวเชื่อมประสาน (wt%)	Solid loading (wt%)
HAC5	ปูนซีเมนต์อะลูมินาสูง + ลิเทียมคาร์บอเนตร้อยละ 1 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์	95 : 5	66.67
HAC10		90 : 10	
HAC15		85 : 15	
HAC20		80 : 20	
WPC5	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาว + วีนนาพาสร้อยละ 2 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์	95 : 5	65.36
WPC10		90 : 10	
WPC15		85 : 15	
WPC20		80 : 20	

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

3. ทำการผสมด้วยเครื่องปั่นผสมแบบใบพัด
4. นำส่วนผสมเทลงแบบหล่ออะคริลิคแล้วปล่อยให้แข็งตัวที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
5. ทำการถอดชิ้นงานออกจากแบบแล้วนำชิ้นงานไปอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
6. นำชิ้นงานไปเผา
    - สำหรับชิ้นงานที่เตรียมโดยใช้ปูนซีเมนต์อะลูมินาสูงเป็นตัวเชื่อมประสาน เผาที่อุณหภูมิ 700 - 1200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที
    - สำหรับชิ้นงานที่เตรียมโดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวเป็นตัวเชื่อมประสานเผาที่อุณหภูมิ 900 - 1200 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 3 องศาเซลเซียสต่อนาที

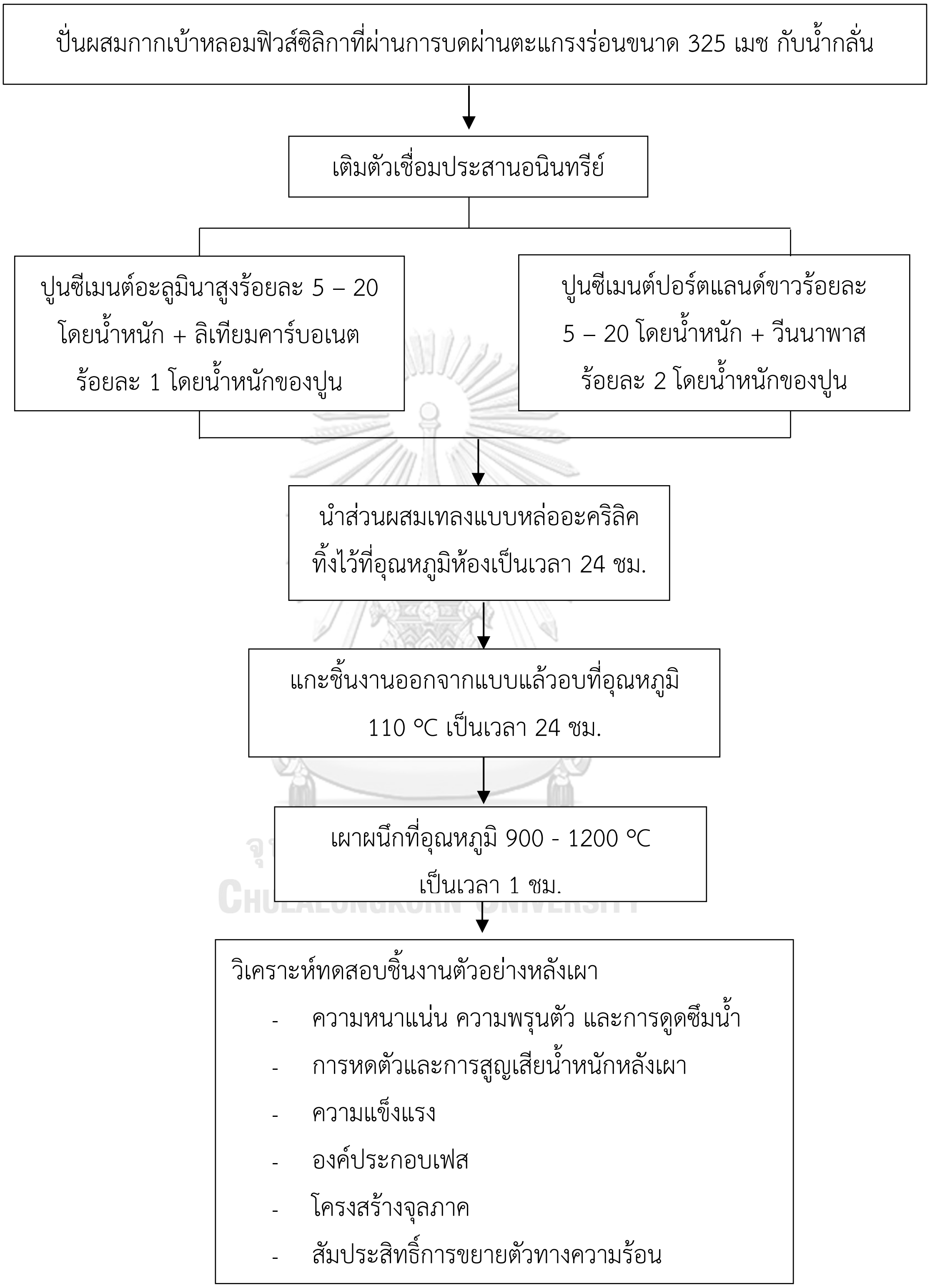
3.2.2.2 ตัวเชื่อมประสานอินทรีย์

สำหรับการขึ้นรูปฟิวส์ซิลิกาด้วยวิธีการหล่อแบบโดยใช้ตัวเชื่อมประสานอินทรีย์ ได้แก่ แป้งข้าวเหนียว มีขั้นตอนการผสมและขึ้นรูปดังนี้

1. ค่อย ๆ เติมฟิวส์ซิลิกาลงไปผสมกับน้ำกลั่น ด้วยปริมาณผงทั้งหมดต่อน้ำร้อยละ 63.8 โดยน้ำหนัก และกวนผสมด้วยเครื่องปั่นผสมแบบใบพัด
2. เติมแป้งข้าวเหนียวร้อยละ 1 - 9 โดยน้ำหนัก (GRF1 - 9) แล้วทำการผสมด้วยเครื่องปั่นผสมแบบใบพัด
3. เทลงแบบหล่ออะคริลิคและคลุมด้วยพลาสติกฟิล์มแล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
4. นำพลาสติกฟิล์มออกแล้วอบต่ออีก 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส
5. เมื่อชิ้นงานแข็งตัวทำการถอดแบบออกแล้วนำชิ้นงานไปอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
6. นำชิ้นงานไปเผาที่อุณหภูมิ 900 - 1300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

3.3 แผนผังการทดลอง



รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการเตรียมเซรามิกซิลิกาพรุนด้วยตัวเชื่อมประสานอนินทรีย์

ปั่นผสมกากเบ้าหลอมฟิวส์ซิลิกาที่ผ่านการบดผ่านตะแกรงร่อนขนาด 325 เมช กับน้ำกลั่น

↓

ผสมแป้งข้าวเหนียวร้อยละ 1 – 9 โดยน้ำหนัก

↓

นำส่วนผสมเทลงแบบหล่ออะคริลิค แล้วคลุมด้วยพลาสติกฟิล์มอบที่อุณหภูมิ 75 °C เป็นเวลา 1 ชม.

↓

แกะพลาสติกฟิล์มออกแล้วอบที่อุณหภูมิ 75 °C เป็นเวลา 24 ชม.

↓

แกะชิ้นงานออกจากแบบแล้วอบที่อุณหภูมิ 110 °C เป็นเวลา 24 ชม.

↓

เผาผนึกที่อุณหภูมิ 900 - 1300 °C เป็นเวลา 1 ชม.

CHULALONGKORN UNIVERSITY

↓

วิเคราะห์ทดสอบชิ้นงานตัวอย่างหลังเผา

- ความหนาแน่น ความพรุนตัว และการดูดซึมน้ำ
- การหดตัวและการสูญเสียน้ำหนักหลังเผา
- ความแข็งแรง
- องค์ประกอบเฟส
- โครงสร้างจุลภาค
- สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน

รูปที่ 3.2 แผนผังแสดงขั้นตอนการเตรียมเซรามิกซิลิกาพรุนด้วยตัวเชื่อมประสานอินทรีย์

3.4 การวิเคราะห์และทดสอบสมบัติของชิ้นงาน

3.4.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบเฟส

ศึกษาองค์ประกอบเฟสของวัตถุดิบด้วยเทคนิค X-ray diffractometry ด้วยเครื่อง X-ray Diffractometer (Bruker รุ่น D8 Advanced) โดยใช้ Cu-K$_\alpha$ radiation ทำการวัดที่ 0.01 องศา (Step Size) ต่อ 1 วินาที (Step Time) ในช่วง 2-Theta เท่ากับ 10 ถึง 80 องศา

3.4.2 ความหนาแน่น

ศึกษาความหนาแน่นของชิ้นงานหลังเผาด้วยเทคนิคอาร์คีมิดิส ตามมาตรฐาน ASTM C20-00 โดยการนำชิ้นงานหลังเผามาต้มในน้ำเดือด 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และสามารถคำนวณหาค่าความหนาแน่นได้ดังสมการที่ (3.1)

$$\text{Bulk density (g/cm}^3) = \frac{D}{W - S} \qquad (3.1)$$

เมื่อ D คือ น้ำหนักแห้งของชิ้นงานชั่งในอากาศ (กรัม)

W คือ น้ำหนักอิ่มตัวของชิ้นงานหลังต้มชั่งในอากาศ (กรัม)

S คือ น้ำหนักอิ่มตัวของชิ้นงานหลังต้มชั่งในน้ำ (กรัม)

3.4.3 ความพรุนตัว

ศึกษาร้อยละความพรุนตัวของชิ้นงานหลังเผา ตามมาตรฐาน ASTM C20-00 โดยคำนวณหาค่าร้อยละความพรุนตัวได้ดังสมการที่ (3.2)

$$\%\ \text{Apparent porosity} = \frac{W - D}{W - S} \times 100 \qquad (3.2)$$

เมื่อ D คือ น้ำหนักแห้งของชิ้นงานชั่งในอากาศ (กรัม)

W คือ น้ำหนักอิ่มตัวของชิ้นงานหลังต้มชั่งในอากาศ (กรัม)

S คือ น้ำหนักอิ่มตัวของชิ้นงานหลังต้มชั่งในน้ำ (กรัม)

3.4.4 การดูดซึมน้ำ

ศึกษาร้อยละการดูดซึมน้ำของชิ้นงานหลังเผา ตามมาตรฐาน ASTM C20-00 โดยคำนวณหาค่าร้อยละการดูดซึมน้ำได้ดังสมการที่ 3.3

$$\%\ \text{Water absorption} = \frac{W - D}{D} \times 100 \qquad (3.3)$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

เมื่อ D คือ น้ำหนักแห้งของชิ้นงานชั่งในอากาศ (กรัม)

W คือ น้ำหนักอิ่มตัวของชิ้นงานหลังต้มชั่งในอากาศ (กรัม)

3.4.5 การหดตัวเชิงปริมาตร

ศึกษาการหดตัวเชิงปริมาตรของชิ้นงานหลังเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยคำนวณได้ดังสมการที่ 3.4

$$\%\ \text{Volume Shrinkage} = \frac{V_d - V_f}{V_d} \times 100 \qquad (3.4)$$

เมื่อ V_d คือ ปริมาตรของชิ้นงานหลังก่อนเผา (ลูกบาศก์มิลลิเมตร)

V_f คือ ปริมาตรของชิ้นงานหลังเผา (ลูกบาศก์มิลลิเมตร)

3.4.6 การสูญเสียน้ำหนักหลังเผา

ศึกษาการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นงานหลังเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ เทียบกับน้ำหนักชิ้นงานก่อนเผา โดยคำนวณได้ดังสมการที่ 3.5

$$\%\ \text{Weight loss} = \frac{W_d - W_f}{W_d} \times 100 \qquad (3.5)$$

เมื่อ W_d คือ น้ำหนักของชิ้นงานก่อนเผา (กรัม)

W_f คือ น้ำหนักของชิ้นงานหลังเผา (กรัม)

3.4.7 ความแข็งแรง

ทดสอบความแข็งแรงโดยทดสอบความต้านทานของแรงกด ด้วยเครื่อง Instron testing machine (รุ่น 5843) ตามมาตรฐาน ASTM C133-97 (2015) โดยทำการขึ้นรูปชิ้นงานทรงลูกบาศก์ขนาด 50 x 50 x 50 มิลลิเมตร แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยคำนวณได้ดังสมการที่ 3.6

$$S\ (\text{MPa}) = \frac{W}{A} \qquad (3.6)$$

เมื่อ S คือ ค่าความต้านทานแรงกด (เมกะพาสคัล)

W คือ แรงสูงสุดที่ชิ้นงานรับได้ (นิวตัน)

A คือ พื้นที่ของชิ้นงาน (ตารางมิลลิเมตร)

ทดสอบความแข็งแรงโดยทดสอบความต้านทานต่อแรงดัดโค้งแบบรับแรงสามจุด (three-point bending) ตามมาตรฐาน ASTM C133-97 (2015) โดยทำการขึ้นรูปชิ้นงานแบบแท่ง 25 x 25 x 150 มิลลิเมตร แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยคำนวณได้ดังสมการที่ 3.7

$$MOR = \frac{3PL}{2bd^2} \tag{3.7}$$

เมื่อ P คือ แรงกระทำ ณ จุดแตกหัก (นิวตัน)

L คือ ระยะห่างระหว่างสองจุดด้านล่างชิ้นทดสอบ (มิลลิเมตร)

B คือ ความกว้างของชิ้นงานทดสอบ (มิลลิเมตร)

D คือความหนาของชิ้นงานทดสอบ (มิลลิเมตร)

3.4.8 การขยายตัวเนื่องจากความร้อน

ศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเมื่อได้รับความร้อนของชิ้นงานหลังเผา ที่อุณหภูมิ 25 - 1000 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที ด้วยเครื่องไดลาโตมิเตอร์ (NETZSCH รุ่น DIL 402 PC) โดยใช้ชิ้นงานแบบแท่งขนาด 5 x 5 x 25 มิลลิเมตร

3.4.9 ความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลัน

ศึกษาความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลันของชิ้นงานหลังเผา โดยนำชิ้นงานทรงลูกบาศก์ขนาด 50 x 50 x 50 มิลลิเมตร ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที และนำออกมาที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 15 นาที ทำซ้ำจำนวน 5 รอบ จากนั้นสังเกตการแตกร้าวของชิ้นงานด้วยตาเปล่า หากชิ้นงานไม่เกิดการแตกร้าวหลังจากการทดสอบดังกล่าวแล้วจึงนำชิ้นงานไปทดสอบความแข็งแรง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 4
ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

4.1 ผลการวิเคราะห์วัตถุดิบ

4.1.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ

วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบในรูปของออกไซด์ ของกากเบ้าหลอมฟิวส์ซิกา ปูนซีเมนต์อะลูมินาสูง และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาว แสดงดังตารางที่ 4.1 พบว่ากากเบ้าหลอมฟิวส์ซิลิกามีองค์ประกอบหลักคือซิลิกา (SiO_2) ซึ่งมีปริมาณสูงถึงร้อยละ 97.90 และมีอะลูมินา (Al_2O_3) โซเดียมออกไซด์ (Na_2O) โพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O) ปนอยู่ปริมาณเล็กน้อยในวัตถุดิบ สำหรับปูนซีเมนต์อะลูมินาสูงมีองค์ประกอบหลักคือ อะลูมินาซึ่งมีปริมาณร้อยละ 75.60 และมีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) อยู่ร้อยละ 15.00 ในส่วนของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวมีองค์ประกอบหลักของแคลเซียมออกไซด์อยู่ปริมาณร้อยละ 63.00 และมีซิลิกาอยู่ร้อยละ 17.90 ส่วนองค์ประกอบรองที่พบคืออะลูมินา และซัลเฟอร์ออกไซด์ (SO_3) นอกจากนี้ยังพบออกไซด์ของโซเดียม (Na_2O) แมกนีเซียม (MgO) และเหล็ก (Fe_2O_3) อยู่ปริมาณเล็กน้อย

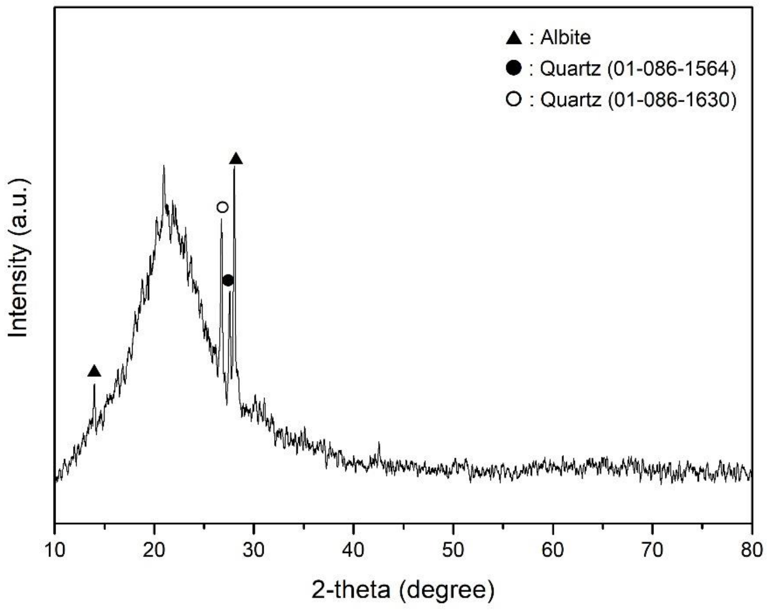
ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ

องค์ประกอบทางเคมี (%)	กากเบ้าหลอมฟิวส์ซิลิกา	ปูนซีเมนต์อะลูมินาสูง	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาว
SiO_2	97.90	-	17.90
Al_2O_3	1.29	75.60	3.13
Na_2O	0.39	0.67	0.11
K_2O	0.20	-	-
CaO	-	15.00	63.00
SO_3	-	-	3.43
MgO	-	-	0.76
Fe_2O_3	-	-	0.19

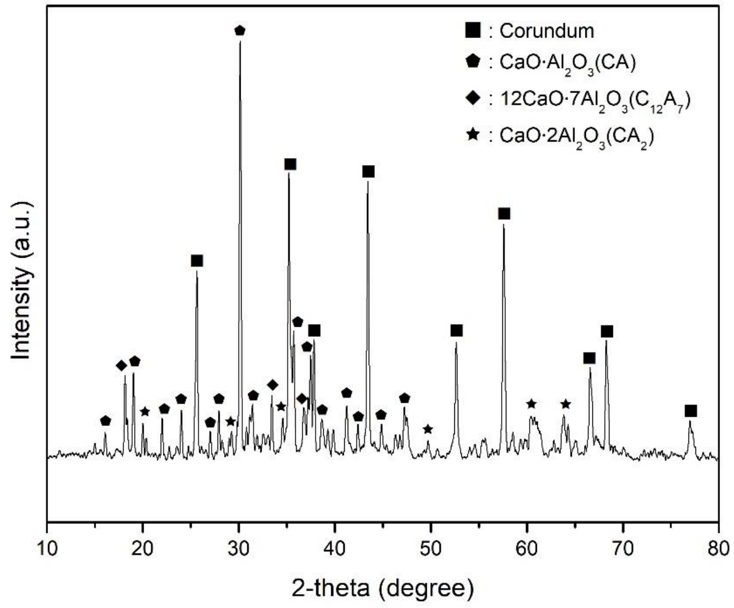
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.1.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสของวัตถุดิบ

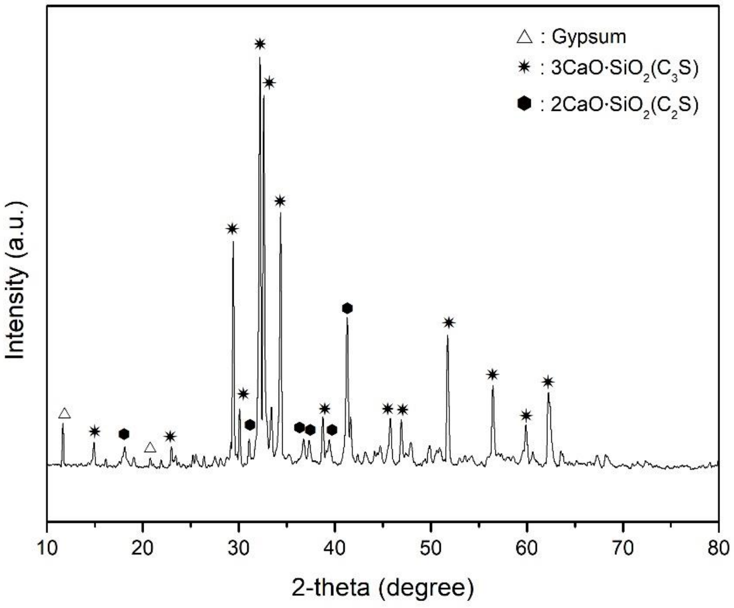
ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสของกากเบ้าหลอมฟิวส์ซิลิกาแสดงดังรูปที่ 4.1 พบว่าผงฟิวส์ซิลิกาแสดงพีคที่มีฐานกว้างที่ 22° ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของซิลิกาที่มีโครงสร้างอสัณฐาน และมีเฟสของแอลไบต์ (albite, JCPDS หมายเลข 00-009-0466) และควอตซ์ (quartz) เป็นองค์ประกอบ โดยควอตซ์มี 2 รูปแบบ ได้แก่ ควอตซ์ที่มีพีคตรงกับ JCPDS หมายเลข 01-086-1630 เป็นควอตซ์ที่เสถียรที่อุณหภูมิห้องสามารถพบได้โดยทั่วไป[37] ในขณะที่ควอตซ์ที่มีพีคตรงกับ JCPDS หมายเลข 01-086-1564 ซึ่งเป็นควอตซ์ที่พบได้เมื่อมีการเพิ่มความดันสูงกว่า 1 บรรยากาศ ถึง 61.4 กิโลบาร์[38] โดยในการพบเฟสควอตซ์นี้ในกากเบ้าหลอมฟิวส์ซิลิกาอาจเกิดจากกระบวนการผลิตฟิวส์ซิลิกา ซึ่งซิลิกาจะถูกหลอมแล้วทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วจึงอาจเกิดเฟสของควอตซ์ที่มีการเรียงตัวแตกต่างจากควอตซ์ที่อยู่ในสภาวะเสถียร และ สำหรับองค์ประกอบเฟสของปูนซีเมนต์อะลูมินาสูงแสดงดังรูปที่ 4.2 พบเฟสของคอรันดัม (corundum, JCPDS หมายเลข 00-042-1468) CA (JCPDS หมายเลข 00-023-1036) และ CA_2 (JCPDS หมายเลข 01-072-0767) เป็นองค์ประกอบหลัก นอกจากนี้ยังพบ $C_{12}A_7$ (JCPDS หมายเลข 01-070-2144) อยู่เล็กน้อย และองค์ประกอบเฟสของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวแสดงดังรูปที่ 4.3 โดยมีองค์ประกอบหลักคือเฟส C_3S (JCPDS หมายเลข 01-086-0402) และ C_2S (JCPDS หมายเลข 00-049-1673) และยังพบพีคของยิปซัม (gypsum, JCPDS หมายเลข 01-074-1433) อยู่เพียงเล็กน้อย



รูปที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสของผงฟิวส์ซิลิกา



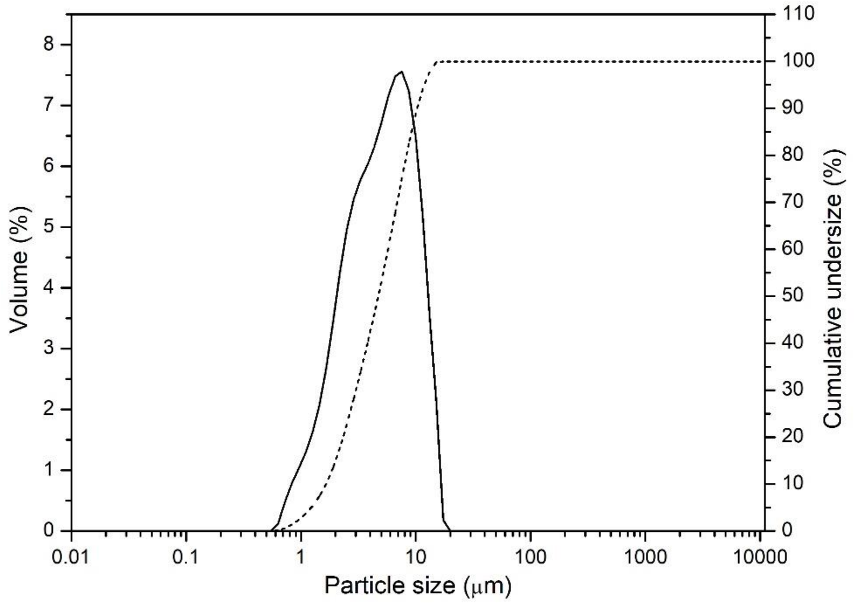
รูปที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสของปูนซีเมนต์อะลูมินาสูง



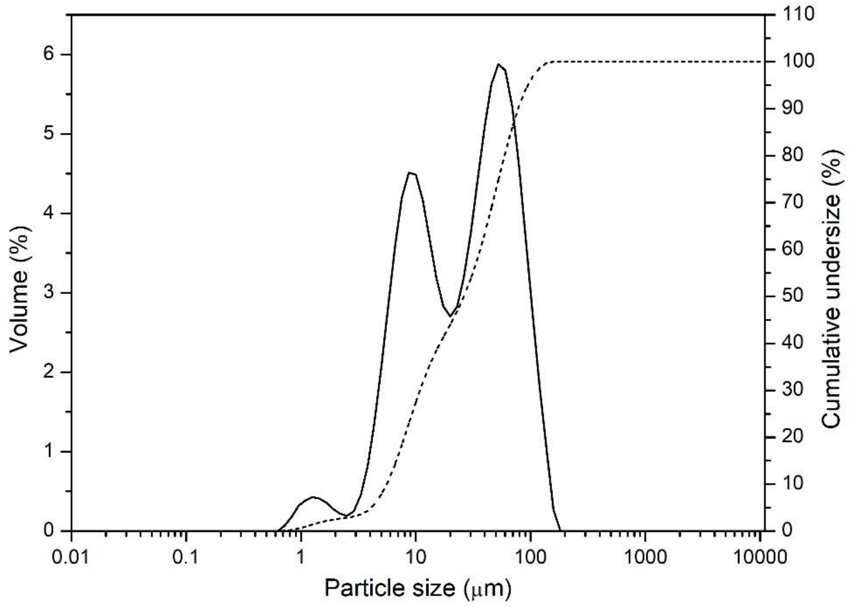
รูปที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาว

4.1.3 ผลการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของวัตถุดิบ

การวิเคราะห์การกระจายตัวขนาดอนุภาคของผงฟิวส์ซิลิกาแสดงดังรูปที่ 4.4 พบว่าผงฟิวส์ซิลิกามีลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคแบบปกติ (normal distribution) มีช่วงการกระจายตัวอยู่ระหว่าง 0.55 ถึง 15.14 ไมโครเมตร โดยร้อยละ 50 โดยปริมาตรที่พบอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าหรือเท่ากับ (d_{50}) 4.71 ไมโครเมตร ส่วนตัวเชื่อมประสานที่ใช้ ได้แก่แป้งข้าวเหนียวการกระจายตัวขนาดอนุภาคแสดงดังรูปที่ 4.5 พบว่าแป้งข้าวเหนียวมีลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคแบ่งเป็น 3 ช่วง (trimodal distribution) ได้แก่ ช่วงขนาดอนุภาคเฉลี่ย 1.10 7.59 และ 45.70 ไมโครเมตร เนื่องจากมีอนุภาคขนาดใหญ่และขนาดเล็กปนกันอยู่ มีช่วงการกระจายตัวของอนุภาคอยู่ระหว่าง 0.63 ถึง 138.04 ไมโครเมตร โดยร้อยละ 50 โดยปริมาตรที่พบอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าหรือเท่ากับ (d_{50}) 26.26 ไมโครเมตร ขนาดอนุภาคของผงปูนซีเมนต์อะลูมินาสูงและผงปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวอ้างอิงจากเอกสารข้อมูลผลิตภัณฑ์ พบว่าผงปูนซีเมนต์อะลูมินาสูงร้อยละ 50 โดยปริมาตรมีขนาดเล็กกว่าหรือเท่ากับ (d_{50}) 9 ไมโครเมตร และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 5 ถึง 30 ไมโครเมตร



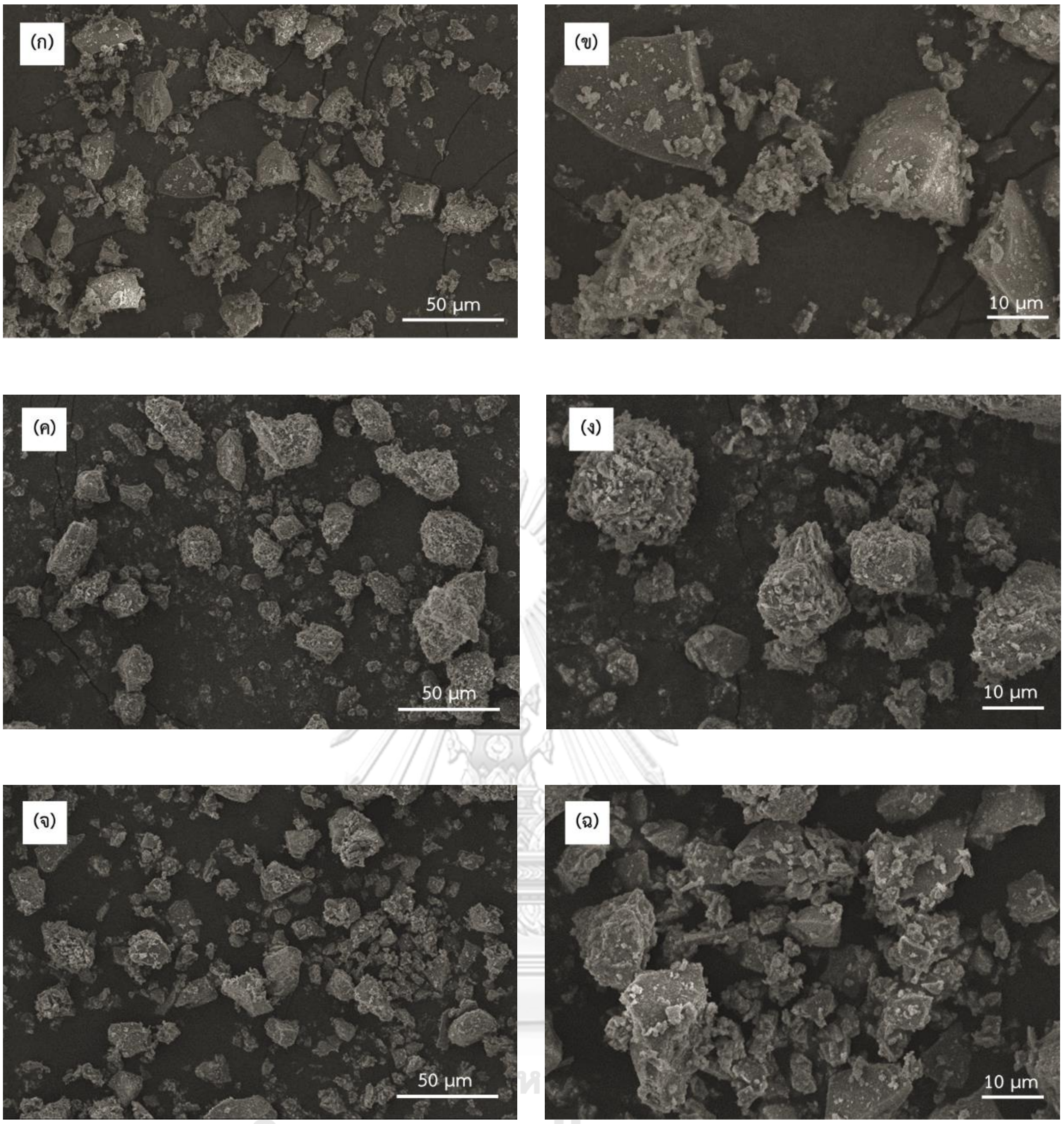
รูปที่ 4.4 การกระจายขนาดอนุภาคของผงฟิวส์ซิลิกา



รูปที่ 4.5 การกระจายขนาดอนุภาคของผงแป้งข้าวเหนียว

4.1.4 ผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของวัตถุดิบ

ลักษณะสัณฐานวิทยาของผงฟิวส์ซิลิกา ผงปูนซีเมนต์อะลูมินาสูง และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาว ด้วยเทคนิค SEM ที่กำลังขยาย 500 เท่า และ 1500 เท่า แสดงดังรูปที่ 4.6 (ก) และ (ข) พบว่าอนุภาคผงของฟิวส์ซิลิกามีทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่ปะปนกันโดยมีขนาดอยู่ในช่วง 3 – 25 ไมโครเมตร ในส่วนของผงปูนซีเมนต์อะลูมินาสูง แสดงดังรูปที่ 4.6 (ค) และ (ง) พบว่ามีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 5 – 50 ไมโครเมตร และเมื่อสังเกตลักษณะสัณฐานวิทยาของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาว แสดงดังรูปที่ 4.6 (จ) และ (ฉ) พบว่ามีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 10 – 20 ไมโครเมตร ซึ่งอนุภาคขนาดใหญ่ที่พบเกิดจากการรวมกันของอนุภาคขนาดเล็ก



CHULALONGKORN UNIVERSITY

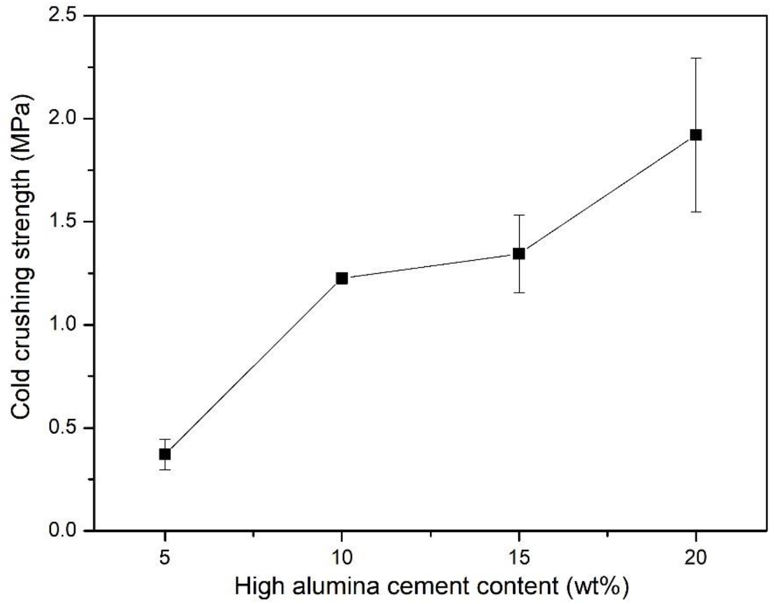
รูปที่ 4.6 โครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 500 เท่า และ 1500 เท่า ของ (ก, ข) ผงฟิวส์ซิลิกา (ค, ง) ผงปูนซีเมนต์อะลูมินาสูง (จ, ฉ) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาว ตามลำดับ

4.2 ผลการศึกษาปริมาณของตัวเชื่อมประสานอนินทรีย์ที่เหมาะสมกับการขึ้นรูปด้วยวิธีหล่อแบบต่อสมบัติของชิ้นงานก่อนและหลังเผา

4.2.1 ชิ้นงานที่ใช้ปูนซีเมนต์อะลูมินาสูงเป็นตัวเชื่อมประสาน

4.2.1.1 ความแข็งแรงของชิ้นงานก่อนเผา

เมื่อทำการขึ้นรูปชิ้นงานฟิวส์ซิลิกาโดยใช้ปูนซีเมนต์อะลูมินาสูงในอัตราส่วนร้อยละ 5 ถึง 20 โดยน้ำหนัก ความแข็งแรงก่อนเผาแสดงดังรูปที่ 4.7 พบว่าเมื่ออัตราส่วนของปูนซีเมนต์อะลูมินาสูงเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 5 ไปเป็นร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ความแข็งแรงก่อนเผาเพิ่มขึ้นจาก 0.37 เมกะพาสคัลไปเป็น 1.92 เมกะพาสคัล ทั้งนี้เนื่องมาจากปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มมากขึ้น สามารถเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันกับน้ำได้มากขึ้น ส่งผลให้เกิดการยึดเกาะกันของอนุภาคได้ดีและมีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 4.7 ความแข็งแรงก่อนเผาของชิ้นงานที่มีปริมาณปูนซีเมนต์อะลูมินาสูงต่างกัน

4.2.1.2 การสูญเสียน้ำหนักหลังเผา

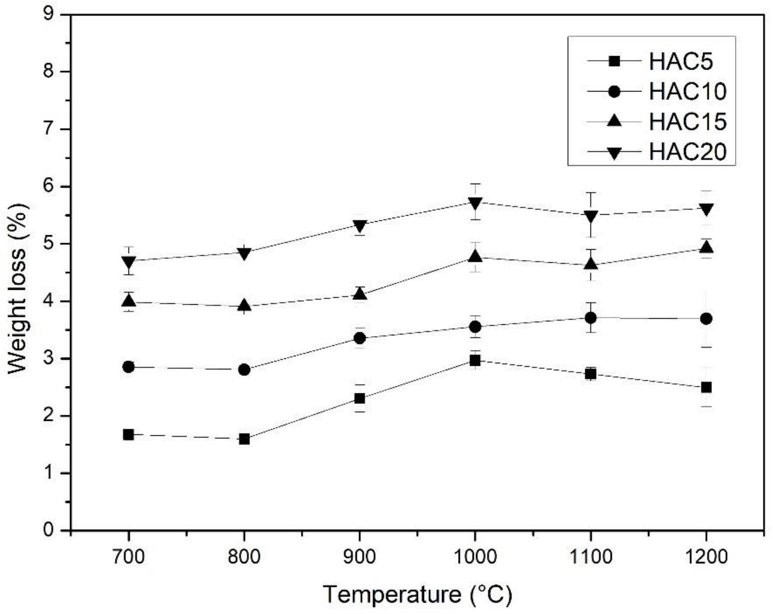
ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักหลังเผาของชิ้นงานฟิวส์ซิลิกาที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 700 ถึง 1200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมงมีร้อยละการสูญเสียน้ำหนักหลังเผาแสดงดังรูปที่ 4.8 พบว่าเมื่ออุณหภูมิเผาเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิ 700 ถึง 1200 องศาเซลเซียส ชิ้นงานมีแนวโน้มร้อยละการสูญเสียน้ำหนักหลังเผาเพิ่มขึ้นเล็กน้อยโดยชิ้นงานที่มีปริมาณปูนซีเมนต์อะลูมินาสูงร้อยละ 5 มีค่าการสูญเสียน้ำหนักหลังเผาร้อยละ 1.68 ถึง 2.50 ชิ้นงานที่มี

ปริมาณปูนซีเมนต์อะลูมินาสูงร้อยละ 10 มีค่าการสูญเสียน้ำหนักหลังเผาร้อยละ 2.85 ถึง 3.69 ชิ้นงานที่มีปริมาณปูนซีเมนต์อะลูมินาสูงร้อยละ 15 มีค่าการสูญเสียน้ำหนักหลังเผาร้อยละ 3.99 ถึง 4.92 ชิ้นงานที่มีปริมาณปูนซีเมนต์อะลูมินาสูงร้อยละ 20 มีค่าการสูญเสียน้ำหนักหลังเผาร้อยละ 4.70 ถึง 5.62 และเมื่อปริมาณของปูนซีเมนต์อะลูมินาสูงเพิ่มมากขึ้นจะมีค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักหลังเผาเพิ่มขึ้น ซึ่งเกิดจากการสลายตัวของน้ำในปูนซีเมนต์ (dehydration) ของ AH_3 C_3AH_6 และ $AlO(OH)$[20] ดังสมการที่ (4.1) ถึง (4.3)

$$Al_2O_3{\cdot}(H_2O)_3 \longrightarrow 2AlO(OH) + 2H_2O \qquad (4.1)$$

$$7Ca_3Al_2O_6{\cdot}6H_2O \longrightarrow 12CaO{\cdot}7Al_2O_3 + 9CaO + 42H_2O \qquad (4.2)$$

$$2AlO(OH) \longrightarrow Al_2O_3 + H_2O \qquad (4.3)$$

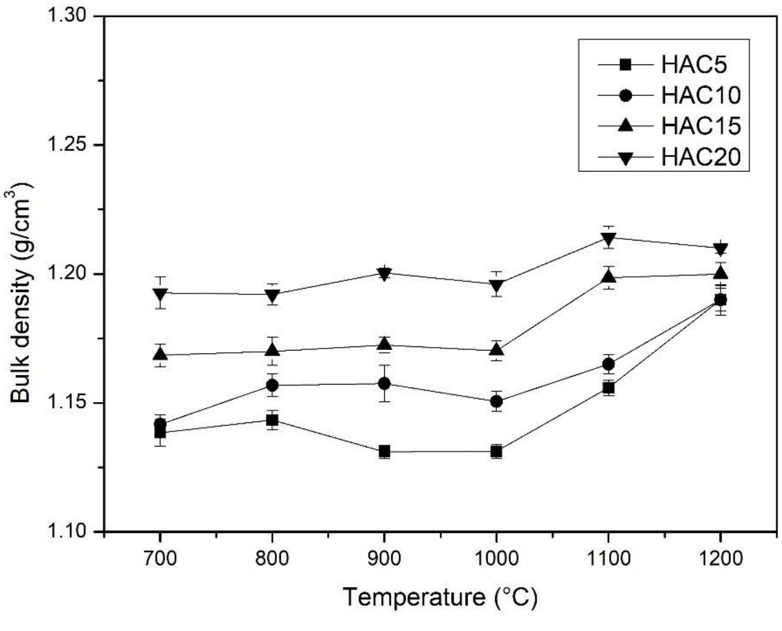


รูปที่ 4.8 การสูญเสียน้ำหนักหลังเผาของชิ้นงานที่มีปริมาณปูนซีเมนต์อะลูมินาสูงต่างกัน

4.2.1.3 ความหนาแน่น ความพรุนตัว และการดูดซึมน้ำ

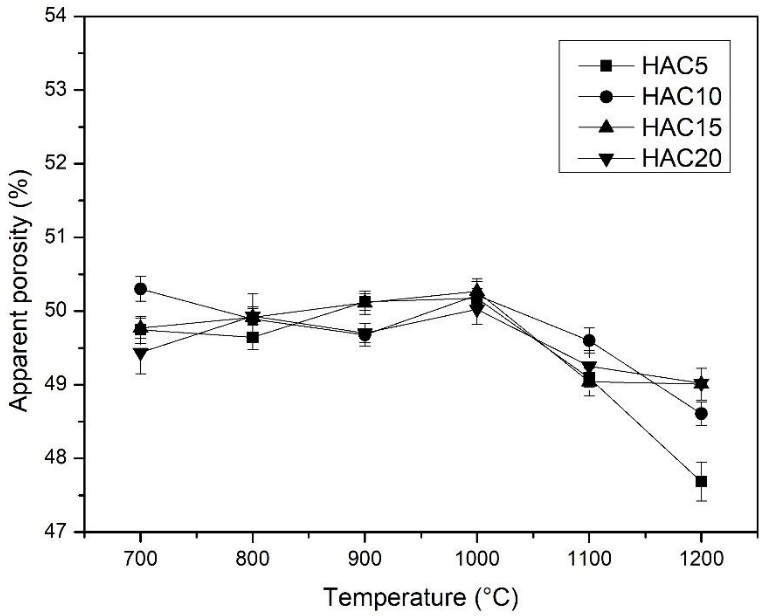
ความหนาแน่นของชิ้นงานฟิวส์ซิลิกาที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 700 ถึง 1200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แสดงดังรูปที่ 4.9 โดยค่าความหนาแน่นของชิ้นงานที่มีปริมาณปูนซีเมนต์อะลูมินาสูงร้อยละ 5 มีค่าเท่ากับ 1.14 1.14 1.13 1.13 1.16 และ 1.19 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ ชิ้นงานที่มีปูนซีเมนต์อะลูมินาสูงร้อยละ 10 มีค่าเท่ากับ 1.14 1.16 1.16 1.15 1.17 และ 1.19 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ ชิ้นงานที่มีปูนซีเมนต์อะลูมินาสูงร้อยละ 15 มีค่าเท่ากับ 1.17 1.17 1.17 1.17 1.20 และ 1.20 กรัมต่อ

ลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ ชิ้นงานที่มีปูนซีเมนต์อะลูมินาสูงร้อยละ 20 มีค่าเท่ากับ 1.19 1.19 1.20 1.20 1.21 และ 1.21 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่าเมื่อปริมาณของปูนซีเมนต์อะลูมินาสูงเพิ่มมากขึ้นค่าความหนาแน่นจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิเดียวกัน เนื่องจากเฟสของคอรันดัมจากปูนซีเมนต์มีค่าความหนาแน่น (4.00 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร[39]) สูงกว่าฟิวส์ซิลิกา (2.20 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร[40]) ซึ่งเป็นเฟสหลัก และเมื่อพิจารณาอุณหภูมิเผาชิ้นงานจากอุณหภูมิ 700 ถึง 1000 องศาเซลเซียส พบว่าค่าความหนาแน่นของชิ้นงานที่มีปูนซีเมนต์อะลูมินาสูงร้อยละ 5 ถึง 20 มีความแตกต่างกันไม่มาก เนื่องจากยังไม่เกิดการเชื่อมประสานกันของอนุภาค และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 1000 ถึง 1200 องศาเซลเซียส พบว่าชิ้นงานที่มีปริมาณปูนซีเมนต์อะลูมินาสูงร้อยละ 5 ถึง 20 ค่าความหนาแน่นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งเกิดจากอนุภาคของฟิวส์ซิลิกาเริ่มมีการเชื่อมประสานกันมากขึ้น แต่ชิ้นงานที่มีปริมาณปูนซีเมนต์อะลูมินาสูงร้อยละ 15 และ 20 โดยน้ำหนักที่เผาที่อุณหภูมิ 1100 และ 1200 องศาเซลเซียส มีค่าความหนาแน่นไม่แตกต่างกัน ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณของอะลูมินาที่เพิ่มมากขึ้นซึ่งอะลูมินามีความทนไฟสูง (จุดหลอมตัวเท่ากับ 2044 องศาเซลเซียส[41]) ทำให้อะลูมินาไปขวางการเชื่อมประสานกันของฟิวส์ซิลิกา

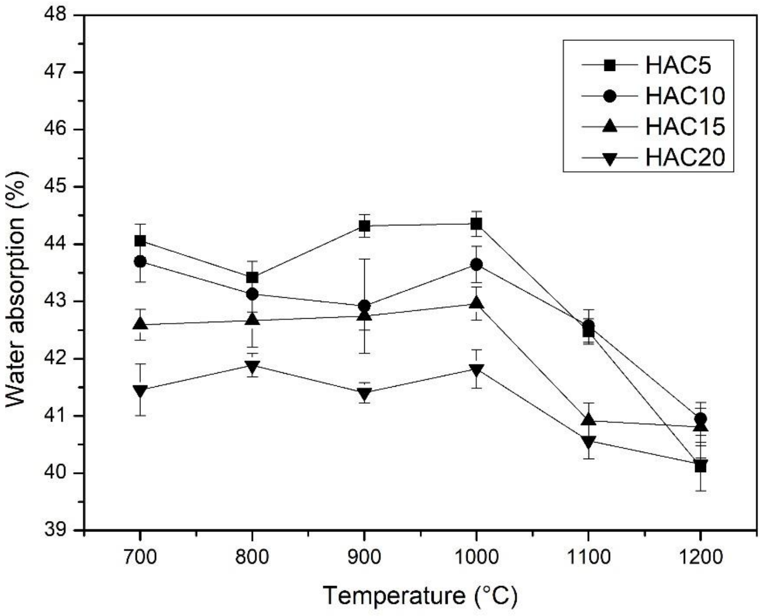


รูปที่ 4.9 ความหนาแน่นหลังเผาของชิ้นงานที่มีปริมาณปูนซีเมนต์อะลูมินาสูงต่างกัน

สำหรับร้อยละความพรุนตัวของชิ้นงานฟิวส์ซิลิกาที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 700 ถึง 1200 องศาเซลเซียสแสดงดังรูปที่ 4.10 โดยชิ้นงานที่มีปริมาณปูนซีเมนต์อะลูมินาสูงร้อยละ 5 มีค่าความพรุนตัวร้อยละ 49.74 49.64 50.13 50.18 49.09 และ 47.68 ตามลำดับ ชิ้นงานที่มีปูนซีเมนต์อะลูมินาสูงร้อยละ 10 มีค่าความพรุนตัวร้อยละ 50.30 49.89 49.68 50.21 49.60 และ 48.61 ตามลำดับ ชิ้นงานที่มีปูนซีเมนต์อะลูมินาสูงร้อยละ 15 มีค่าความพรุนตัวร้อยละ 49.77 49.92 50.11 50.27 49.04 และ 49.01 ตามลำดับ ชิ้นงานที่มีปูนซีเมนต์อะลูมินาสูงร้อยละ 20 มีค่าความพรุนตัวร้อยละ 49.44 49.93 49.70 50.02 49.25 และ 49.02 ตามลำดับ นอกจากนี้ร้อยละการดูดซึมน้ำแสดงดังรูปที่ 4.11 พบว่าร้อยละความพรุนตัวและร้อยละการดูดซึมน้ำมีความสัมพันธ์สอดคล้องกันกับค่าความหนาแน่น โดยเมื่อพิจารณาอุณหภูมิเผาชิ้นงานจากอุณหภูมิ 700 ถึง 1000 องศาเซลเซียสจะมีค่าร้อยละความพรุนตัวและร้อยละการดูดซึมน้ำเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย และจะมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 1000 ไปเป็น 1200 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.10 ความพรุนตัวหลังเผาของชิ้นงานที่มีปริมาณปูนซีเมนต์อะลูมินาสูงต่างกัน

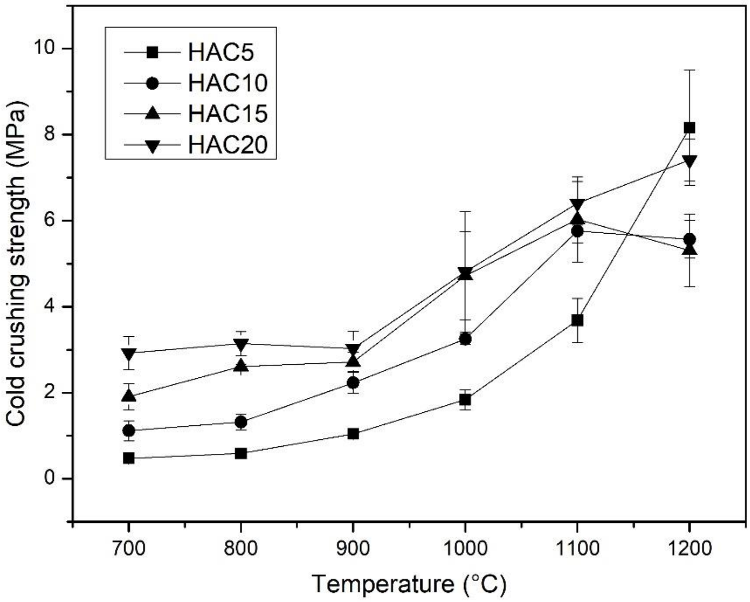


รูปที่ 4.11 การดูดซึมน้ำหลังเผาของชิ้นงานที่มีปริมาณปูนซีเมนต์อะลูมินาสูงต่างกัน

4.2.1.4 ความแข็งแรงหลังเผา

ความแข็งแรงต่อแรงอัดของชิ้นงานฟิวส์ซิลิกาที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 700 ถึง 1200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แสดงดังรูปที่ 4.12 โดยค่าความแข็งแรงของชิ้นงานที่มีปริมาณปูนซีเมนต์อะลูมินาสูงร้อยละ 5 มีค่าเท่ากับ 0.47 0.59 1.04 1.84 3.68 และ 8.16 เมกะพาสคัล ตามลำดับ ชิ้นงานที่มีปริมาณปูนซีเมนต์อะลูมินาสูงร้อยละ 10 มีค่าเท่ากับ 1.11 1.32 2.23 3.25 5.76 และ 5.57 เมกะพาสคัล ตามลำดับ ชิ้นงานที่มีปริมาณปูนซีเมนต์อะลูมินาสูงร้อยละ 15 มีค่าเท่ากับ 1.91 2.61 2.71 4.72 6.03 และ 5.31 เมกะพาสคัล ตามลำดับ ชิ้นงานที่มีปริมาณปูนซีเมนต์อะลูมินาสูงร้อยละ 20 มีค่าเท่ากับ 2.92 3.14 3.03 4.81 6.40 และ 7.41 เมกะพาสคัล ตามลำดับ จากผลการทดลองเมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิ 700 ถึง 1100 องศาเซลเซียส พบว่าปริมาณของปูนซีเมนต์อะลูมินาสูงเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ความแข็งแรงมีค่าเพิ่มมากขึ้น เนื่องมาจากการประสานกันของโครงสร้างปูนซีเมนต์อะลูมินาสูงเมื่อเกิดปฏิกิริยากับน้ำ ในทำนองเดียวกันเมื่ออุณหภูมิเผาเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้นด้วย แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิถึง 1200 องศาเซลเซียส พบว่าความแข็งแรงของชิ้นงานที่มีปริมาณปูนซีเมนต์อะลูมินาสูงร้อยละ 5 มีค่ามากที่สุด เนื่องจากชิ้นงานมีปริมาณของอะลูมินาน้อยทำให้ฟิวส์ซิลิกาเชื่อมประสานกันได้ดี สำหรับชิ้นงานที่มีปริมาณปูนซีเมนต์อะลูมินาสูงร้อยละ 10 ถึง 20 พบว่าค่าความแข็งแรงจะมีแนวโน้มลดลง เนื่องจาก

อะลูมินามีจุดหลอมตัวสูงทำให้เมื่อมีปริมาณมากขึ้นจึงเกิดการเผาผนึกได้ยากขึ้น และจากงานวิจัยของ A. Kazemi และคณะ[42] พบว่าเมื่อปริมาณของอะลูมินาเพิ่มมากขึ้น อะลูมินาจะสามารถละลายในซิลิกาอสัณฐานทำให้เร่งการเกิดเฟสคริสโตบาไลต์ซึ่งมีผลทำให้ความแข็งแรงลดลง เนื่องจากการเปลี่ยนเฟสของคริสโตบาไลต์เมื่ออุณหภูมิเย็นตัวลง คริสโตบาไลต์จะเปลี่ยนจากบีตา ไปเป็นแอลฟา ทำให้การขยายตัวเชิงปริมาตรเปลี่ยนแปลงไปร้อยละ 2.8[35] ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดรอยแตกระดับจุลภาค (microcrack) ขึ้นในชิ้นงาน ทำให้ความแข็งแรงของชิ้นงานลดลง



รูปที่ 4.12 ความแข็งแรงหลังเผาของชิ้นงานที่มีปริมาณปูนซีเมนต์อะลูมินาสูงต่างกัน

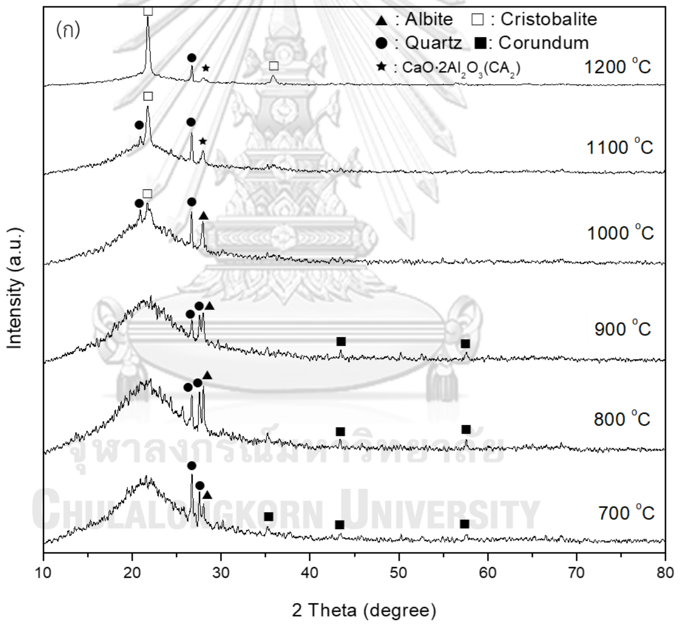
CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.2.1.5 องค์ประกอบเฟสของชิ้นงานหลังเผา

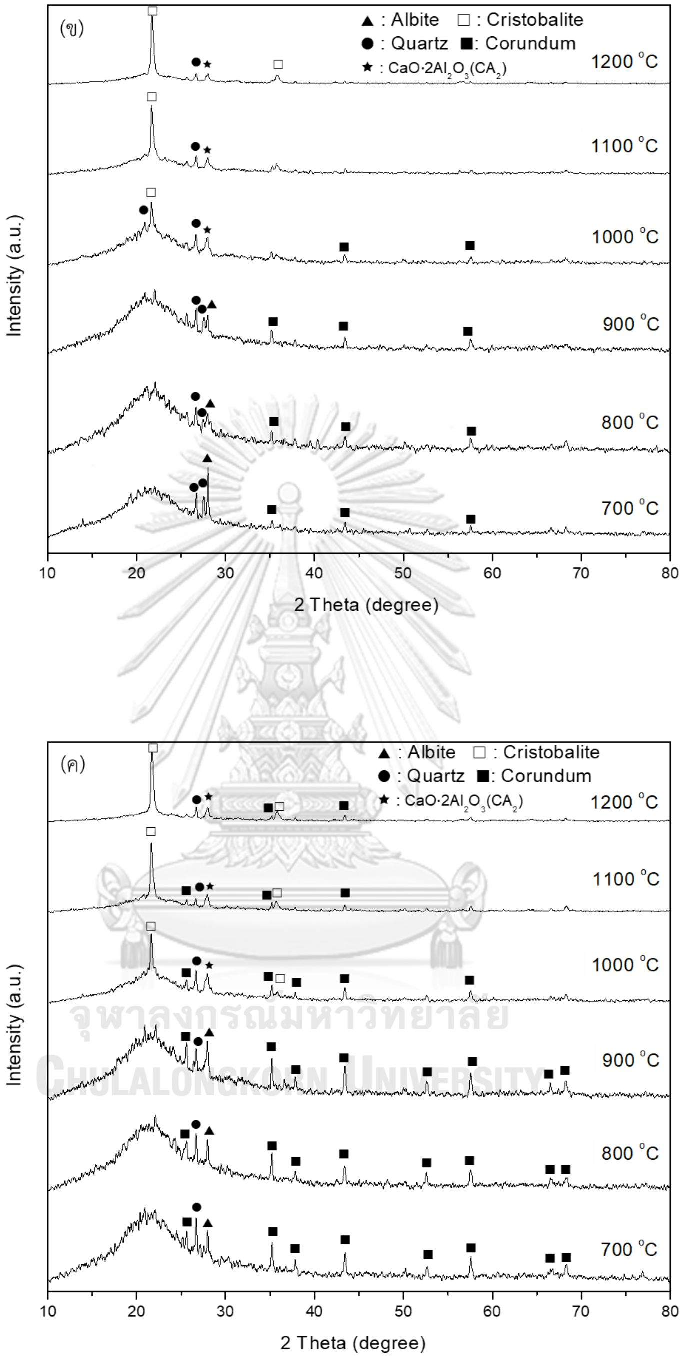
องค์ประกอบเฟสของชิ้นงานฟิวส์ซิลิกาที่มีปริมาณปูนซีเมนต์อะลูมินาสูงร้อยละ 5 ถึง 20 ที่อุณหภูมิ 700 ถึง 1200 องศาเซลเซียส แสดงดังรูปที่ 4.13 พบว่าชิ้นงานฟิวส์ซิลิกาที่มีปริมาณปูนซีเมนต์อะลูมินาสูงร้อยละ 5 ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส พบเฟสของควอตซ์ แอลไบต์ พีคที่มีฐานกว้างของโครงสร้างอสัณฐานของฟิวส์ซิลิกาซึ่งเป็นวัตถุดิบหลักและพบคอรันดัมเกิดขึ้นเล็กน้อย เมื่ออุณภูมิเพิ่มขึ้นถึง 1000 องศาเซลเซียสจะเริ่มเกิดเฟสของคริสโตบาไลต์ ซึ่งปกติในกรณีที่ไม่มีสิ่งเจอปนเฟสคริสโตบาไลต์เริมเกิดที่อุณหภูมิ 1300 องศาเซลเซียส[43] นอกจากนี้ที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียสจะพบเฟสของ CA_2 และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิถึง 1200 องศาเซลเซียสจะพบพีคของคริสโตบาไลต์ชัดเจนขึ้นรวมกับโครงสร้าง

อสัณฐานของฟิวส์ซิลิกาที่ยังอยู่เพียงเล็กน้อย เช่นเดียวกันกับชิ้นงานฟิวส์ซิลิกาที่มีปริมาณปูนซีเมนต์อะลูมินาสูงร้อยละ 10 ถึง 20 ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส พบเฟสของควอตซ์ แอลไบต์ พีคที่มีฐานกว้างของโครงสร้างอสัณฐานของฟิวส์ซิลิกาซึ่งเป็นวัตถุดิบหลัก และยังพบพีคเฟสของคอรันดัมสูงขึ้นเมื่อปริมาณปูนซีเมนต์อะลูมินาสูงเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึง 1000 องศาเซลเซียสจะพบเฟสของ CA_2 และเป็นอุณหภูมิที่เริ่มเกิดเฟสของคริสโตบาไลต์ขึ้นในชิ้นงาน และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิถึง 1200 องศาเซลเซียสจะพบพีคของคริสโตบาไลต์สูงขึ้นเช่นกัน

เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.14 จะเห็นว่าเมื่อปริมาณของปูนซีเมนต์อะลูมินาสูงเพิ่มมากขึ้นจากร้อยละ 5 ถึง 20 พบพีคของคริสโตบาไลต์ชัดเจนขึ้น และความเข้มพีคโครงสร้างอสัณฐานจะลดลงตามลำดับ

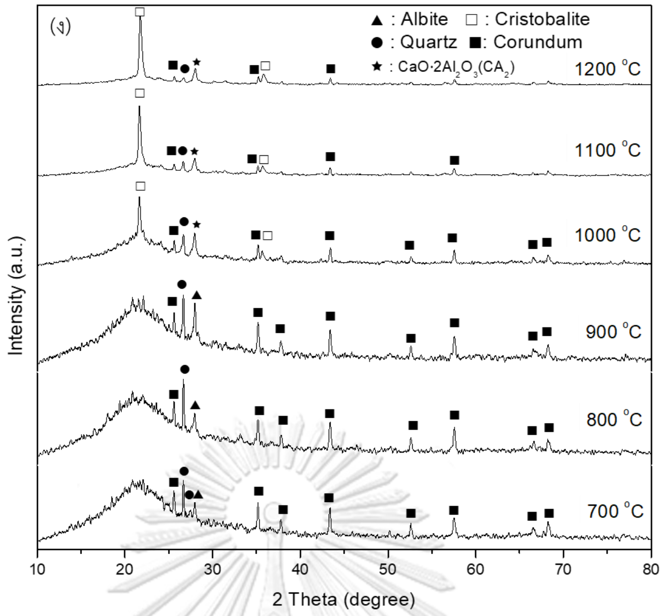


รูปที่ 4.13 องค์ประกอบเฟสของของชิ้นงานที่มีตัวเชื่อมประสานปูนซีเมนต์อะลูมินาสูง ร้อยละ (ก) 5 (ข) 10 (ค) 15 และ (ง) 20

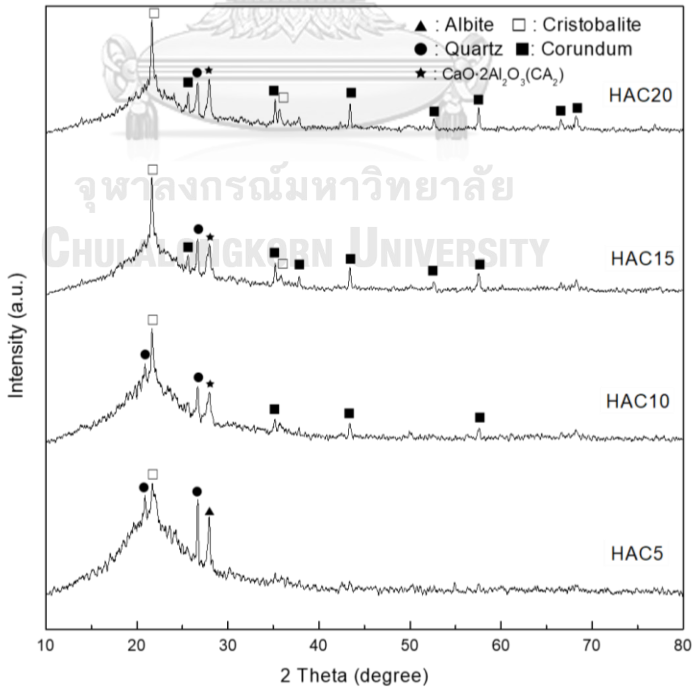


จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 4.13 องค์ประกอบเฟสของของชิ้นงานที่มีตัวเชื่อมประสานปูนซีเมนต์อะลูมินาสูง ร้อยละ (ก) 5 (ข) 10 (ค) 15 และ (ง) 20 (ต่อ)



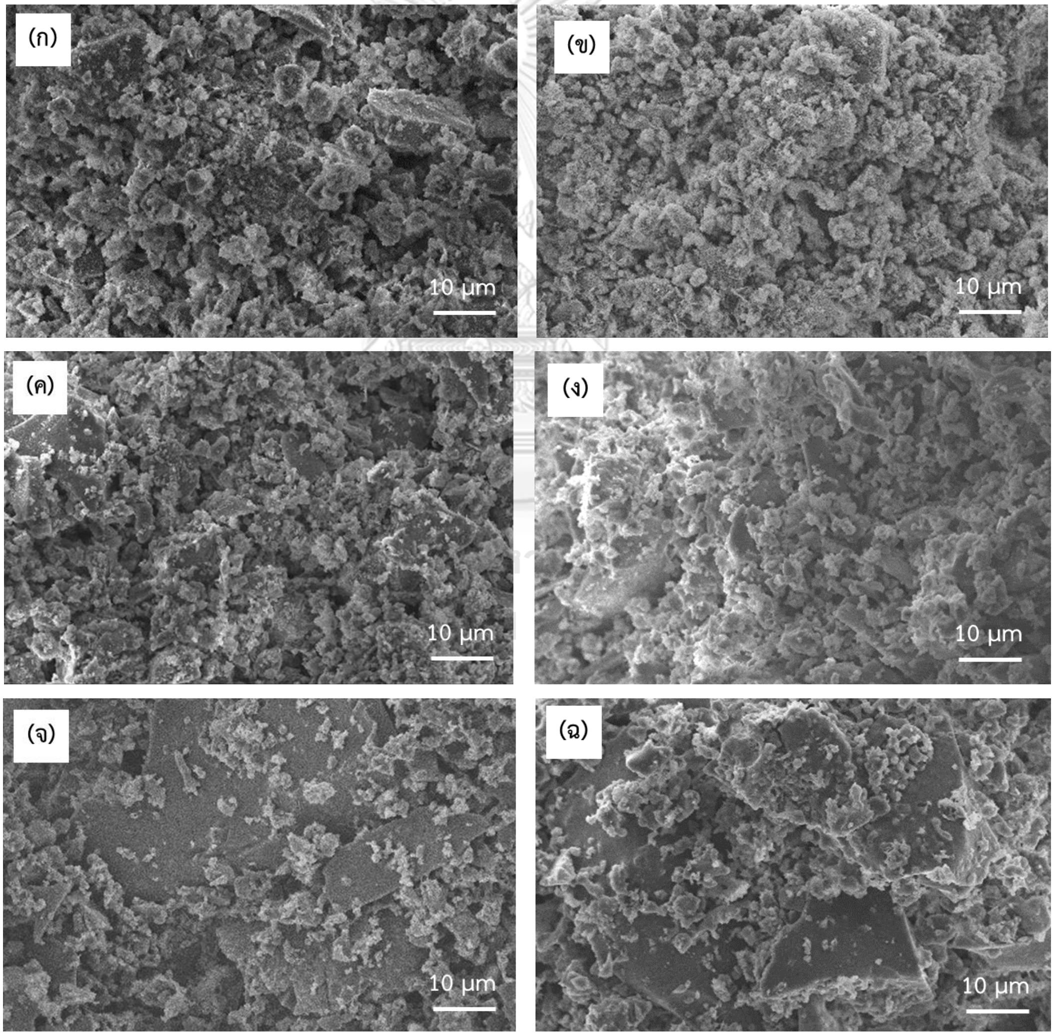
รูปที่ 4.13 องค์ประกอบเฟสของของชิ้นงานที่มีตัวเชื่อมประสานปูนซีเมนต์อะลูมินาสูง ร้อยละ (ก) 5 (ข) 10 (ค) 15 และ (ง) 20 (ต่อ)



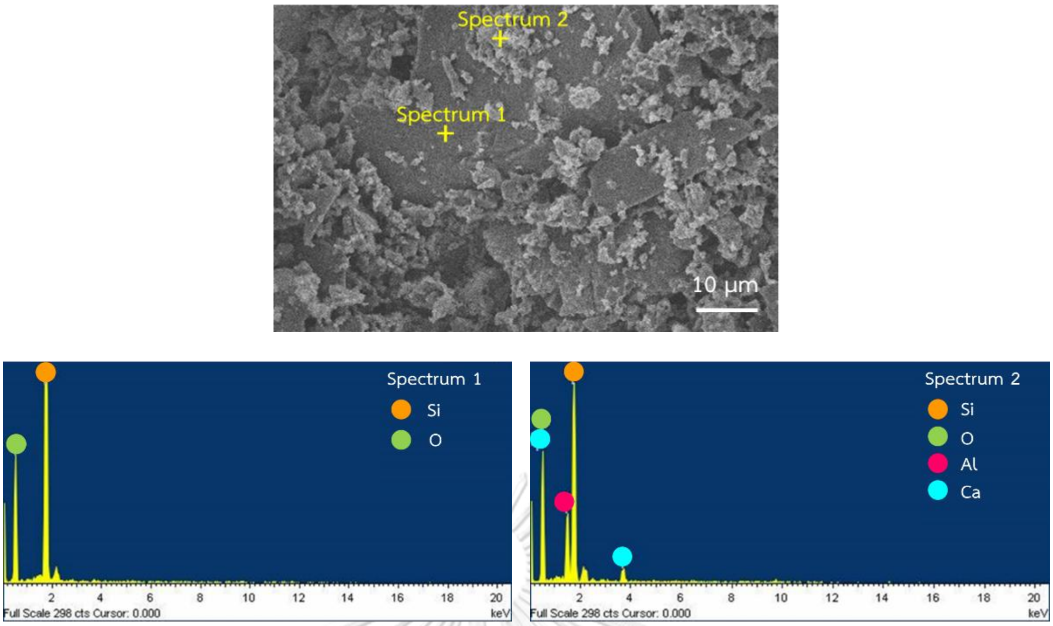
รูปที่ 4.14 องค์ประกอบเฟสของของชิ้นงานที่มีตัวเชื่อมประสานปูนซีเมนต์อะลูมินาสูง ร้อยละ 5 ถึง 20 ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส

4.2.1.6 โครงสร้างจุลภาค

นำชิ้นงานที่มีปูนซีเมนต์อะลูมินาสูงร้อยละ 10 ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 700 ถึง 1200 องศาเซลเซียส หลังจากทดสอบความแข็งแรงแล้วนำมาตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 1500 เท่า เนื่องจากเป็นชิ้นงานที่มีปริมาณปูนซีเมนต์อะลูมินาน้อยที่สุดที่มีความแข็งแรงใกล้เคียงกับแม่แบบสำหรับผลิตกระจกหลอมที่ใช้งานในปัจจุบัน ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานแสดงดังรูปที่ 4.15 พบว่าชิ้นงานมีความพรุนตัวสูง และเมื่ออุณหภูมิเผาสูงขึ้นจะเห็นว่าอนุภาคของฟิวส์ซิลิกามีการเชื่อมประสานกันมากขึ้น เมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค EDS แสดงดังรูปที่ 4.16 มีผงอะลูมินากระจายอยู่โดยรอบของอนุภาคฟิวส์ซิลิกา



รูปที่ 4.15 โครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 1500 เท่า ของชิ้นงานที่มีร้อยละ 10 ของปูนซีเมนต์อะลูมินาสูงที่อุณหภูมิ (ก) 700 °C (ข) 800 °C (ค) 900 °C (ง) 1000 °C (จ) 1100°C และ (ฉ) 1200 °C



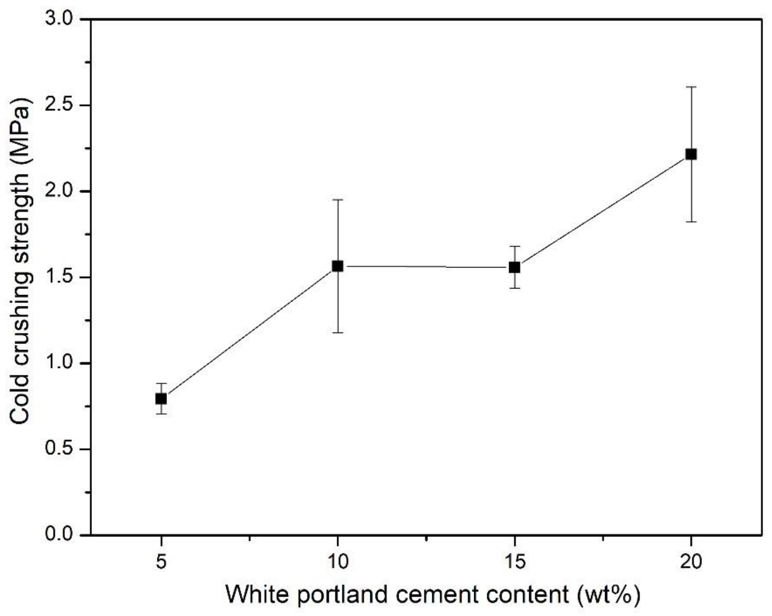
รูปที่ 4.16 ผล EDS ของชิ้นงานที่มีร้อยละ 10 ของปูนซีเมนต์อะลูมินาสูงที่อุณหภูมิ 1100°C

จากการศึกษาผลของปริมาณปูนซีเมนต์อะลูมินาสูงต่อสมบัติต่าง ๆ ที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงานเซรามิกซิลิกาพรุน พบว่าชิ้นงานที่ใช้ปูนซีเมนต์อะลูมินาสูงเป็นตัวเชื่อมประสานร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก เผาที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส เป็นชิ้นงานที่เหมาะสมที่จะนำมาเตรียมผลิตภัณฑ์ตัวอย่าง เนื่องจากชิ้นงานมีความหนาแน่นของชิ้นงาน 1.17 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์ทางการค้า และเป็นอุณหภูมิที่ต่ำที่สุดและใช้ปริมาณตัวเชื่อมประสานน้อยที่สุดโดยที่มีความแข็งแรงใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์ทางการค้า และยังคงมีพีคของโครงสร้างอสัณฐานของฟิวส์ซิลิกาอยู่ ทำให้มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนที่ต่ำกว่าผลิตภัณฑ์ทางการค้า

4.2.2 ชิ้นงานที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวเป็นตัวเชื่อมประสาน

4.2.2.1 ความแข็งแรงก่อนเผา

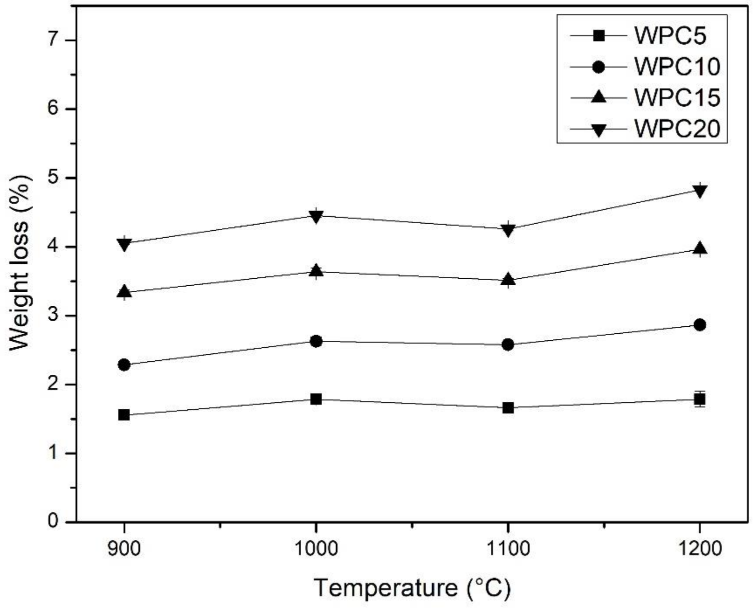
เมื่อทำการขึ้นรูปชิ้นงานฟิวส์ซิลิกาโดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวในอัตราส่วนร้อยละ 5 ถึง 20 โดยน้ำหนัก ความแข็งแรงก่อนเผาของชิ้นงานแสดงดังรูปที่ 4.17 พบว่าเมื่อปริมาณของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 5 ไปเป็นร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ความแข็งแรงก่อนเผาจะเพิ่มขึ้นจาก 0.80 เมกะพาสคัลไปเป็น 2.22 เมกะพาสคัล ทั้งนี้เนื่องมาจากปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวเพิ่มมากขึ้น สามารถเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันกับน้ำได้มากขึ้น ส่งผลให้เกิดการยึดเกาะกันของอนุภาคได้ดีและมีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 4.17 ความแข็งแรงก่อนเผาของชิ้นงานที่มีปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวต่างกัน

4.2.2.2 การสูญเสียน้ำหนักหลังเผา

ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักหลังเผาของชิ้นงานฟิวส์ซิลิกาที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 900 ถึง 1200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมงมีร้อยละการสูญเสียน้ำหนักหลังเผาแสดงดังรูปที่ 4.18 พบว่าเมื่ออุณหภูมิเผาเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิ 900 ถึง 1200 องศาเซลเซียส ชิ้นงานมีแนวโน้มร้อยละการสูญเสียน้ำหนักหลังเผาเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยชิ้นงานที่มีปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก มีค่าการสูญเสียน้ำหนักหลังเผาร้อยละ 1.56 ถึง 1.79 ชิ้นงานที่มีปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก มีค่าการสูญเสียน้ำหนักหลังเผาร้อยละ 2.29 ถึง 2.86 ชิ้นงานที่มีปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก มีค่าการสูญเสียน้ำหนักหลังเผาร้อยละ 3.34 ถึง 3.97 ชิ้นงานที่มีปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก มีค่าการสูญเสียน้ำหนักหลังเผาร้อยละ 4.05 ถึง 4.83 และเมื่อปริมาณของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวเพิ่มมากขึ้นจะมีค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักหลังเผาเพิ่มขึ้น ซึ่งเกิดจากการสลายตัวของน้ำในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาว รวมถึงการสลายตัวของน้ำในโครงสร้างของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ขาว

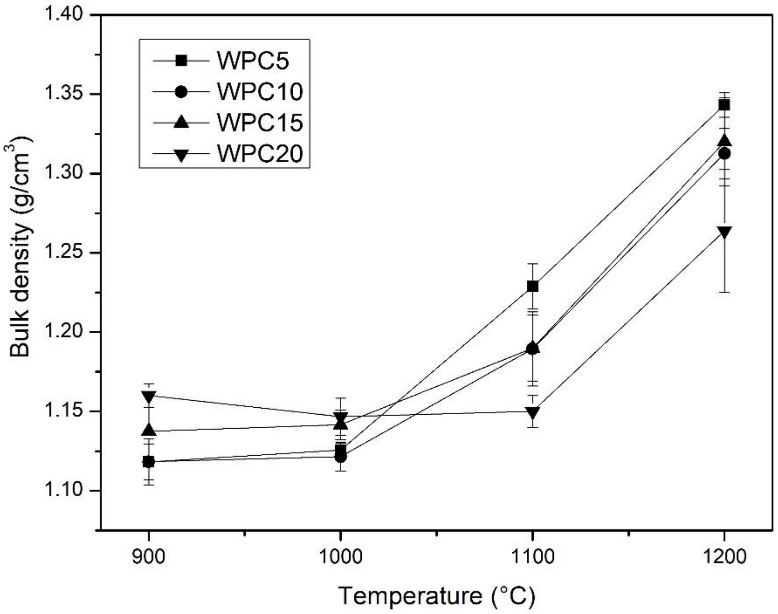


รูปที่ 4.18 การสูญเสียน้ำหนักหลังเผาของชิ้นงานที่มีปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวต่างกัน

4.2.2.3 ความหนาแน่น ความพรุนตัว และการดูดซึมน้ำ

ความหนาแน่นของชิ้นงานฟิวส์ซิลิกาที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 900 ถึง 1200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แสดงดังรูปที่ 4.19 ค่าความหนาแน่นของชิ้นงานที่มีปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก มีค่าเท่ากับ 1.12 1.13 1.23 และ 1.34 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ ชิ้นงานที่มีปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก มีค่าเท่ากับ 1.12 1.12 1.19 และ 1.31 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ ชิ้นงานที่มีปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก มีค่าเท่ากับ 1.14 1.14 1.19 และ 1.32 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ ชิ้นงานที่มีปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก มีค่าเท่ากับ 1.16 1.15 1.15 และ 1.26 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่าเมื่อปริมาณของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวเพิ่มมากขึ้นค่าความหนาแน่นของชิ้นงานเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากข้อมูลผลิตภัณฑ์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนขาวมีความหนาแน่น 2.8 ถึง 3.2 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งมีค่ามากกว่าความหนาแน่นของฟิวส์ซิลิกา (2.20 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร) เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิ 900 ถึง 1000 องศาเซลเซียส แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าความหนาแน่นเป็นผลมาจากการเผาผนึกของชิ้นงาน และเมื่อพิจารณาอุณหภูมิเผาชิ้นงานจากอุณหภูมิ 900 ถึง 1000 องศาเซลเซียส พบว่าค่าความหนาแน่นของชิ้นงานที่มีปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวร้อยละ 5 ถึง 20 โดย

น้ำหนัก มีความแตกต่างกันไม่มาก เนื่องจากยังไม่เกิดการเชื่อมประสานกันของอนุภาค และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 1000 ถึง 1200 องศาเซลเซียส พบว่าชิ้นงานที่มีปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวร้อยละ 5 ถึง 20 โดยน้ำหนัก ค่าความหนาแน่นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน และชิ้นงานที่มีปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวร้อยละ 5 มีค่าความหนาแน่นสูงสุด เนื่องจากเมื่อพิจารณาจากเฟสไดอะแกรมของแคลเซียมออกไซด์กับซิลิกา[44] พบว่าเมื่อปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวที่เติมน้อย ส่งผลให้แคลเซียมออกไซด์ทำหน้าที่เป็นฟลักซ์ช่วยลดจุดหลอมตัว ทำให้อนุภาคของฟิวส์ซิลิกาจากวัตถุดิบ และซิลิกาจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวมีการเชื่อมประสานกันมากขึ้น ความหนาแน่นจึงสูงขึ้น

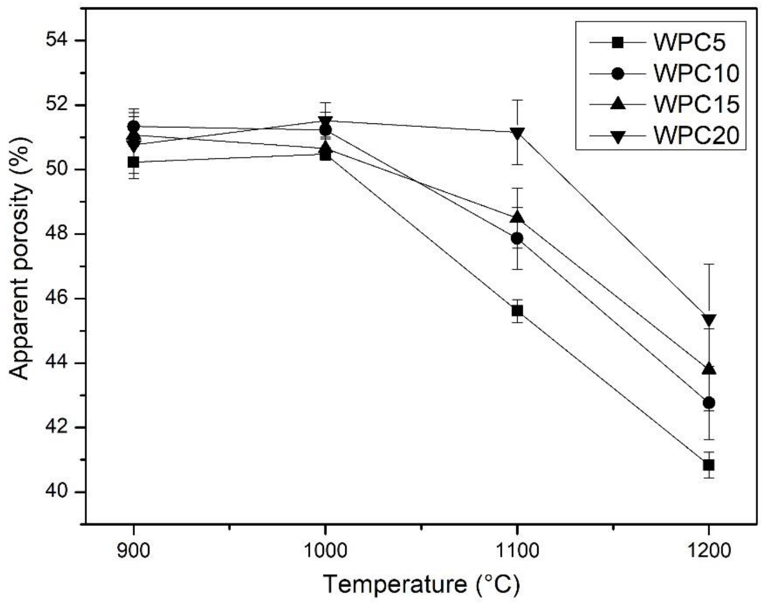


รูปที่ 4.19 ความหนาแน่นหลังเผาของชิ้นงานที่มีปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวต่างกัน

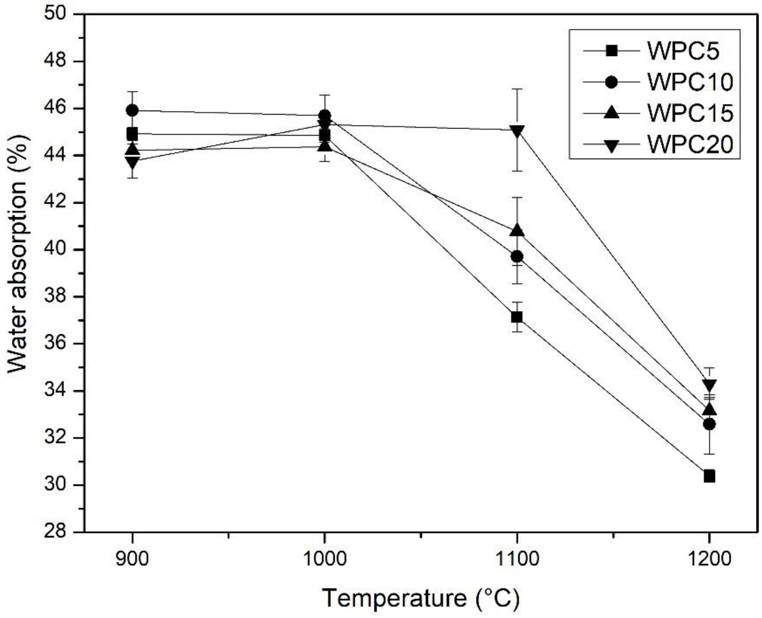
Chulalongkorn University

สำหรับร้อยละความพรุนตัวของชิ้นงานฟิวส์ซิลิกาที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 900 ถึง 1200 องศาเซลเซียสแสดงดังรูปที่ 4.20 โดยชิ้นงานที่มีปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก มีค่าความพรุนตัวร้อยละ 50.23 50.48 45.61 และ 40.84 ตามลำดับ ชิ้นงานที่มีปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก มีค่าความพรุนตัวร้อยละ 51.34 51.23 47.87 และ 42.76 ตามลำดับ ชิ้นงานที่มีปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก มีค่าความพรุนตัวร้อยละ 51.07 50.66 48.49 และ 43.79 ตามลำดับ ชิ้นงานที่มีปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก มีค่าความพรุนตัวร้อยละ 50.76 51.52 51.16 และ 45.38 ตามลำดับ นอกจากนี้ร้อยละการดูดซึมน้ำแสดงดังรูปที่ 4.21 พบว่าร้อยละความพรุนตัวและร้อยละการดูดซึมน้ำมีความสัมพันธ์สอดคล้องกันกับค่าความ

หนาแน่น โดยเมื่อพิจารณาอุณหภูมิเผาชิ้นงานจากอุณหภูมิ 900 ถึง 1000 องศาเซลเซียสจะมีค่าร้อยละความพรุนตัวและร้อยละการดูดซึมน้ำใกล้เคียงกัน และจะมีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจนเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 1000 ไปเป็น 1200 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.20 ความพรุนตัวหลังเผาของชิ้นงานที่มีปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวต่างกัน

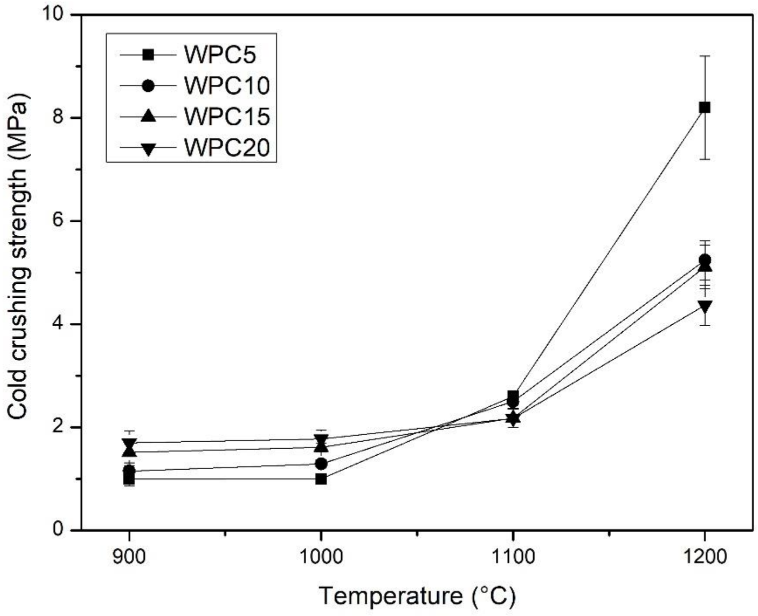


รูปที่ 4.21 การดูดซึมน้ำหลังเผาของชิ้นงานที่มีปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวต่างกัน

4.2.2.4 ความแข็งแรงหลังเผา

ความแข็งแรงต่อแรงอัดของชิ้นงานฟิวส์ซิลิกาที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 900 ถึง 1200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แสดงดังรูปที่ 4.22 โดยค่าความแข็งแรงของชิ้นงานที่มีปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก มีค่าเท่ากับ 0.99 1.00 2.60 และ 8.20 เมกะพาสคัล ตามลำดับ ชิ้นงานที่มีปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก มีค่าเท่ากับ 1.15 1.29 2.5 และ 5.24 เมกะพาสคัล ตามลำดับ ชิ้นงานที่มีปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก มีค่าเท่ากับ 1.51 1.61 2.18 และ 5.11 เมกะพาสคัล ตามลำดับ ชิ้นงานที่มีปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก มีค่าเท่ากับ 1.70 1.77 2.17 และ 4.37 เมกะพาสคัล ตามลำดับ จากผลการทดลองเมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิ 900 ถึง 1000 องศาเซลเซียส พบว่าชิ้นงานที่มีปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 5 ถึง 20 โดยน้ำหนัก ค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 1100 ถึง 1200 องศาเซลเซียส พบว่าความแข็งแรงของชิ้นงานที่มีปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวร้อยละ 5 โดยน้ำหนักมีค่าสูงสุด เนื่องจากในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวมีองค์ประกอบของแคลเซียมออกไซด์ที่เป็นฟลักซ์ซึ่งเป็นสารที่ทำให้ลดจุดหลอมตัวของชิ้นงาน เมื่อมีปริมาณน้อย จึงทำให้ความแข็งแรงสูง และเมื่อปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวเพิ่มขึ้นร้อยละ 10 ถึง 20 โดยน้ำหนัก จะมีค่าความแข็งแรงลดลงตามลำดับ และเมื่ออุณหภูมิเผาเพิ่มขึ้นจาก 900 ถึง 1000 องศาเซลเซียส พบว่าค่าความแข็งแรงมีความเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย และจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนจากการเชื่อมประสานกันของอนุภาคเมื่ออุณหภูมิเผาเพิ่มขึ้นจาก 1100 ถึง 1200 องศาเซลเซียส

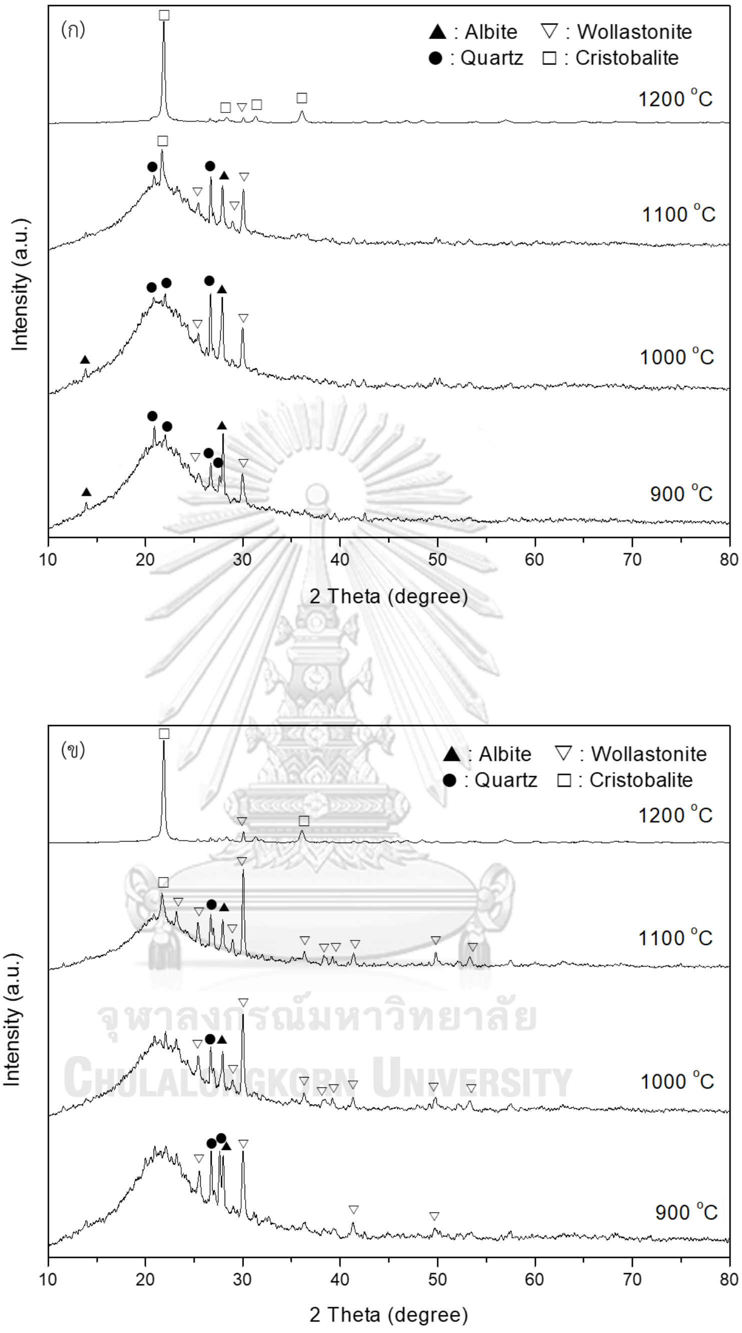
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 4.22 ความแข็งแรงหลังเผาของชิ้นงานที่มีปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวต่างกัน

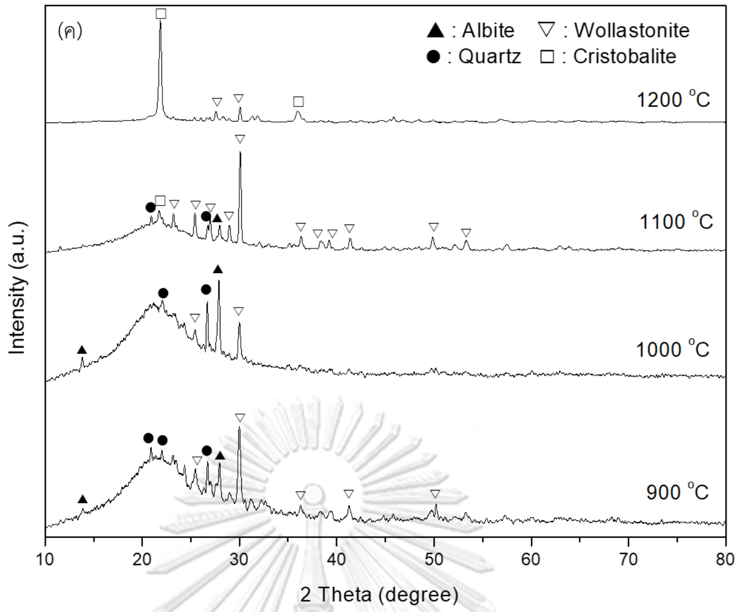
4.2.2.5 องค์ประกอบเฟสของชิ้นงานหลังเผา

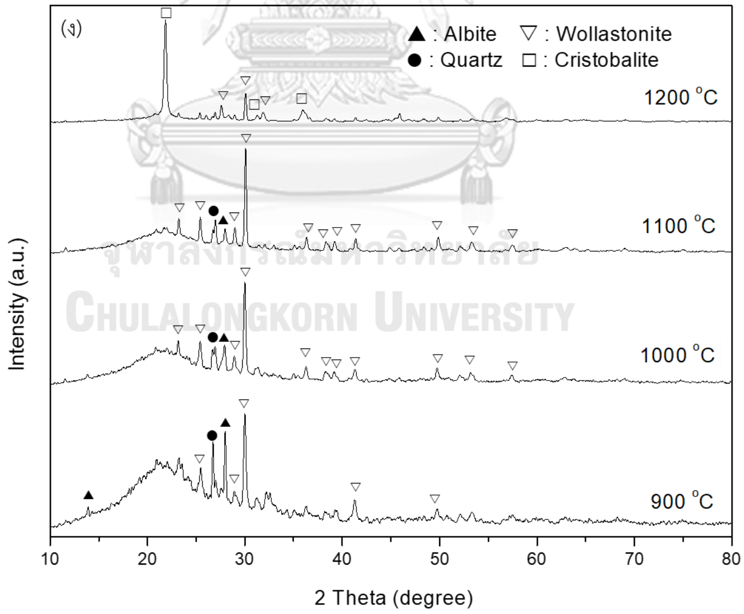
องค์ประกอบเฟสของชิ้นงานฟิวส์ซิลิกาที่มีปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวร้อยละ 5 ถึง 20 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 900 ถึง 1200 องศาเซลเซียส แสดงดังรูปที่ 4.23 พบว่า ชิ้นงานฟิวส์ซิลิกาที่มีปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส พบเฟสของควอตซ์ แอลไบต์ และพีคที่มีฐานกว้างของโครงสร้างอสัญฐานของฟิวส์ซิลิกาซึ่งเป็นวัตถุดิบหลัก นอกจากนี้ยังพบเฟสของโวลลาสโทไนต์ (wollastonite, $CaSiO_3$) ที่เกิดจากปฏิกิริยาแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจลกับซิลิกา เมื่ออุณภูมิเพิ่มขึ้นถึง 1100 องศาเซลเซียสจะเริ่มเกิดเฟสของคริสโตบาไลต์ และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิถึง 1200 องศาเซลเซียสจะพบพีคของคริสโตบาไลต์อย่างชัดเจน เช่นเดียวกันกับชิ้นงานฟิวส์ซิลิกาที่มีปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวร้อยละ 10 ถึง 20 โดยน้ำหนัก นอกจากนี้เมื่อปริมาณของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ขาวเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 5 ถึง 20 ที่อุณหภูมิ 900 ถึง 1100 องศาเซลเซียส จะพบเฟสของโวลลาสโทไนต์ชัดเจนขึ้น และปริมาณพีคโครงสร้างอสัญฐานจะลดลงตามลำดับ และพบว่าเมื่อปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวเพิ่มขึ้นไม่มีผลต่อปริมาณของเฟสคริสโตบาไลต์ ซึ่งแตกต่างกับชิ้นงานที่มีการเติมปูนซีเมนต์อะลูมินาสูง ซึ่งการเติมปริมาณปูนซีเมนต์อะลูมินาสูงเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้เฟสของคริสโตบาไลต์เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนดังแสดงในหัวข้อที่ 4.2.1.5



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 4.23 องค์ประกอบเฟสของของชิ้นงานที่มีปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาว ร้อยละ (ก) 5 (ข) 10 (ค) 15 และ (ง) 20





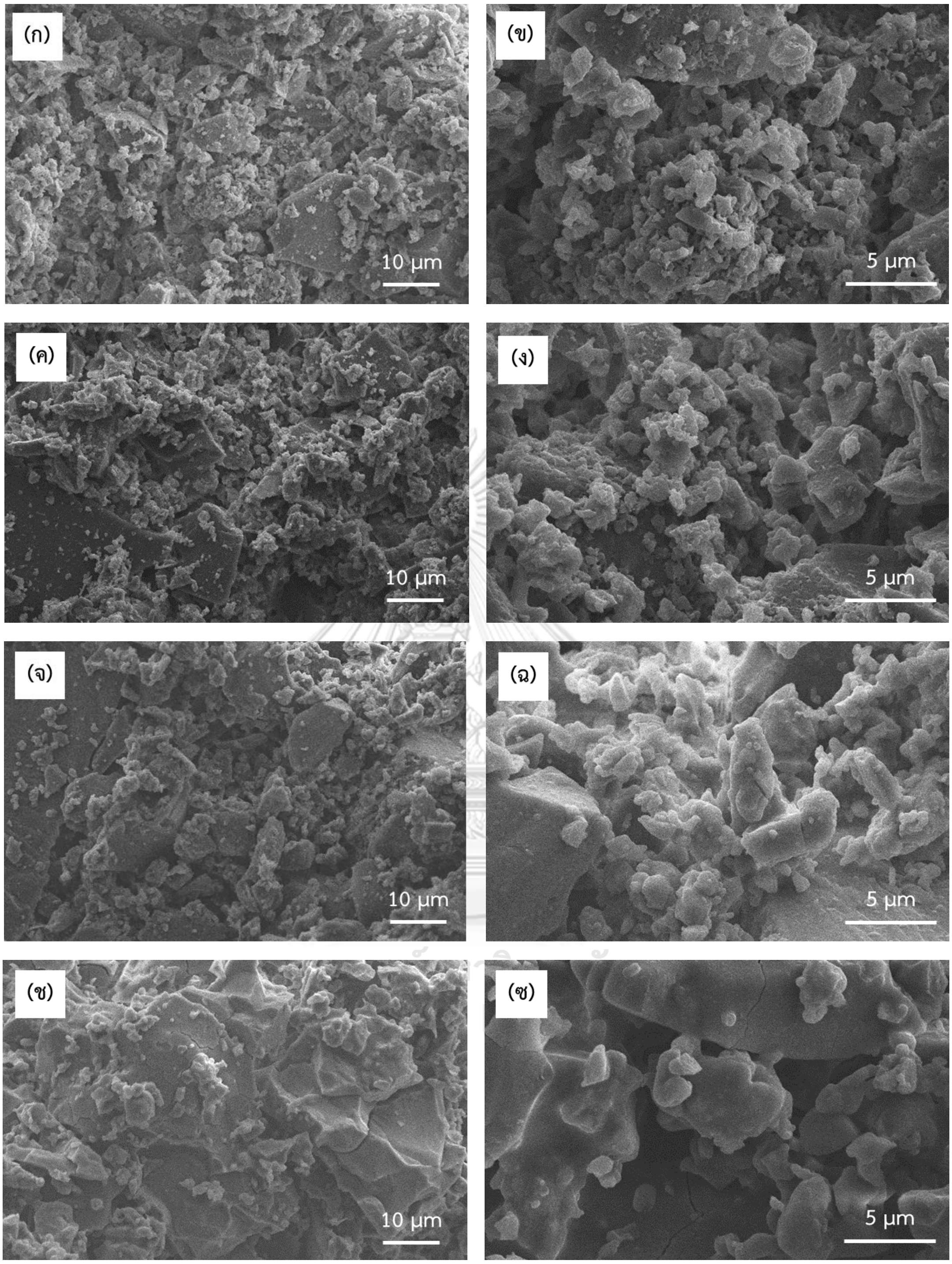
รูปที่ 4.23 องค์ประกอบเฟสของของชิ้นงานที่มีปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาว ร้อยละ (ก) 5 (ข) 10 (ค) 15 และ (ง) 20 (ต่อ)

4.2.2.6 โครงสร้างจุลภาค

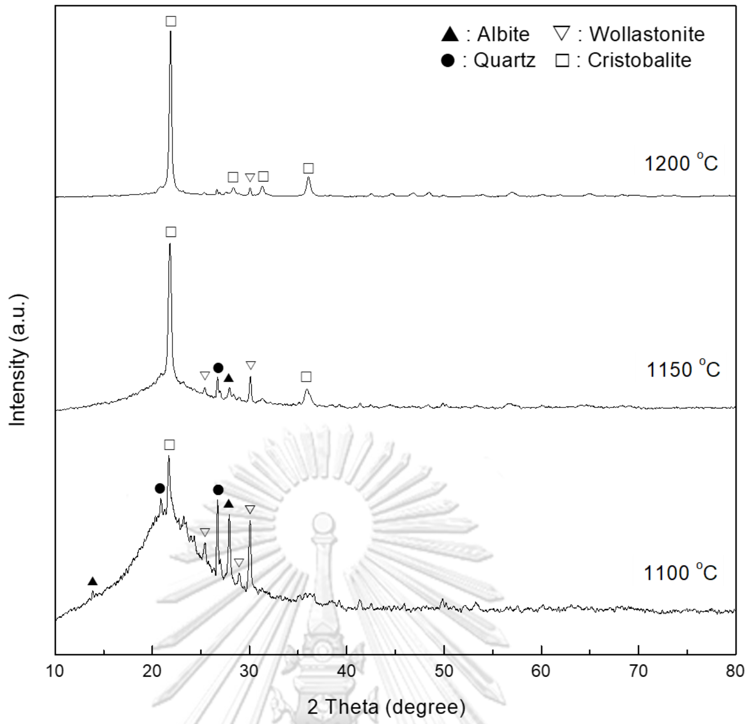
นำชิ้นงานที่มีปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวร้อยละ 5 โดยน้ำหนักที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 900 ถึง 1200 องศาเซลเซียส หลังทดสอบความแข็งแรงแล้วมาตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 1500 และ 5000 เท่า เนื่องจากเป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวปริมาณน้อยที่สุดที่มีความแข็งแรงใกล้เคียงกับแม่แบบสำหรับผลิตกระจกหลอมที่ใช้งานในปัจจุบัน ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานแสดงดังรูปที่ 4.24 พบว่าชิ้นงานที่เผาที่อุณหภูมิ 900 ถึง 1000 องศาเซลเซียสมีความพรุนตัวสูง ลักษณะอนุภาคยังไม่เกิดการเชื่อมประสานกันและเมื่ออุณหภูมิเผาสูงขึ้นจะเห็นว่าอนุภาคของฟิวส์ซิลิกามีการเชื่อมประสานกันมากขึ้นดังรูปที่ 4.24 (ฉ)

สำหรับชิ้นงานที่มีปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เป็นปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวที่มีสมบัติเบื้องต้นเหมาะสมโดยมีความแข็งแรงสูงสุดเท่ากับ 2.60 เมกะพาสคัล ที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส แต่ยังมีค่าความแข็งแรงต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับแม่แบบสำหรับผลิตกระจกหลอมที่ใช้งานในปัจจุบัน จึงนำชิ้นงานที่มีปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวร้อยละ 5 โดยน้ำหนักมาเผาที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียส พบว่ามีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 3.31 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ความพรุนตัวร้อยละ 42.40 ค่าความแข็งแรงเท่ากับ 5.29 เมกะพาสคัล และยังคงมีโครงสร้างอสัณฐานอยู่ในชิ้นงานแสดงดังรูปที่ 4.25

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 4.24 โครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 1500 เท่า และ 5000 เท่า ของชิ้นงานที่มีร้อยละ 5 ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวที่อุณหภูมิ (ก, ข) 900 °C (ค, ง) 1000 °C (จ, ฉ) 1100 °C และ (ช, ซ) 1200 °C



รูปที่ 4.25 องค์ประกอบเฟสของของชิ้นงานที่มีปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวร้อยละ 5 ที่อุณหภูมิ 1100 ถึง 1200 องศาเซลเซียส

จากการศึกษาผลของปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวต่อสมบัติต่าง ๆ ที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงานเซรามิกซิลิกาพรุน พบว่าชิ้นงานที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวเป็นตัวเชื่อมประสานร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เผาที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียส เป็นชิ้นงานที่เหมาะสมที่จะนำมาเตรียมผลิตภัณฑ์ตัวอย่าง เนื่องจากชิ้นงานมีความหนาแน่นของชิ้นงาน 1.31 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์ทางการค้า และเป็นอุณหภูมิที่ต่ำที่สุดและใช้ปริมาณตัวเชื่อมประสานน้อยที่สุดโดยที่มีความแข็งแรงใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์ทางการค้า และยังคงมีพีคของโครงสร้างอสัณฐานของฟิวส์ซิลิกาอยู่ ทำให้มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนที่ต่ำกว่าผลิตภัณฑ์ทางการค้า

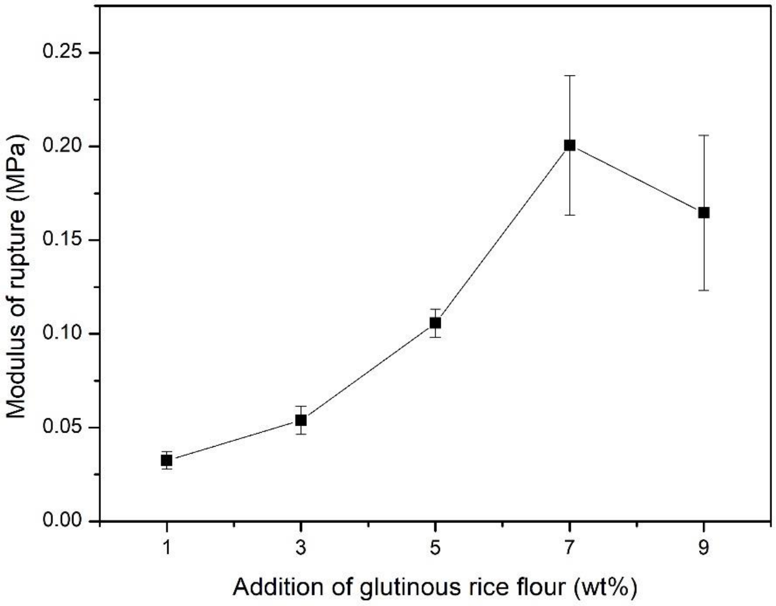
4.3 การศึกษาปริมาณตัวเชื่อมประสานอินทรีย์ที่เหมาะสมกับการขึ้นรูปด้วยวิธีหล่อแบบต่อสมบัติของชิ้นงานก่อนและหลังเผา

4.3.1 แป้งข้าวเหนียว

4.3.1.1 ความแข็งแรงก่อนเผา

ความแข็งแรงต่อแรงดัด (modulus or rupture) ก่อนเผาของชิ้นงานฟิวส์ซิลิกาที่เติมแป้งข้าวเหนียวในปริมาณร้อยละ 1 ถึง 9 โดยน้ำหนัก แสดงดังรูปที่ 4.26 พบว่าเมื่อปริมาณแป้งข้าวเหนียวเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 1 ไปเป็นร้อยละ 7 โดยน้ำหนัก ความแข็งแรงก่อน

เผาจะเพิ่มขึ้นจาก 0.03 เมกะพาสคัลไปเป็น 0.20 เมกะพาสคัล และเมื่อปริมาณของแป้งข้าวเหนียวเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 9 โดยน้ำหนัก พบว่าค่าความแข็งแรงก่อนเผาลดลง เนื่องมาจากความหนืดของสเลอรีที่เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ทำให้ฟองอากาศถูกกักอยู่ในสเลอรีซึ่งอาจส่งผลให้เกิดตำหนิขึ้นในชิ้นงานหลังจากการขึ้นรูป ดังนั้นในส่วนของการขึ้นรูปโดยใช้แป้งข้าวเหนียวเป็นตัวเชื่อมประสานจะศึกษาปริมาณแป้งข้าวเหนียวร้อยละ 7 โดยน้ำหนัก เนื่องจากเป็นปริมาณที่มีความแข็งแรงสูงสุด

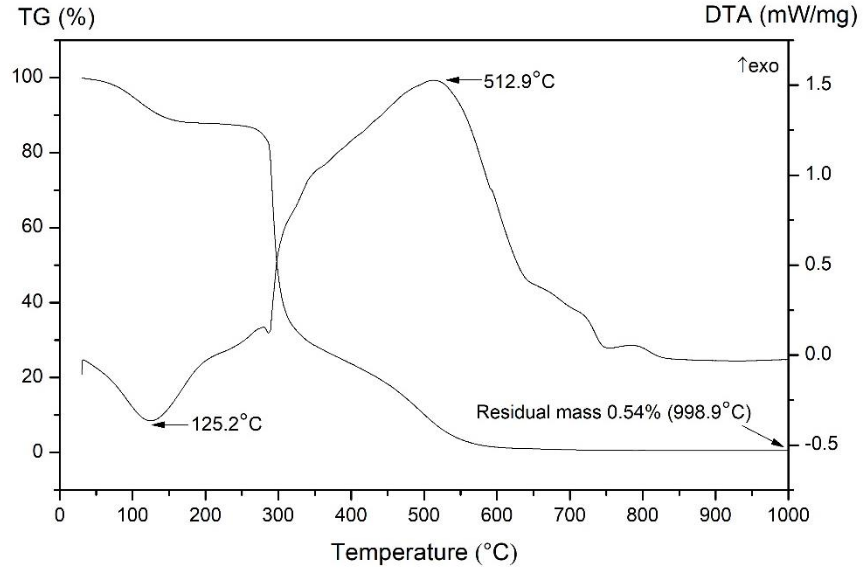


รูปที่ 4.26 ความแข็งแรงก่อนเผาของชิ้นงานที่มีปริมาณแป้งข้าวเหนียวต่างกัน

Chulalongkorn University

4.3.1.2 การสลายตัวทางความร้อนของแป้งข้าวเหนียว

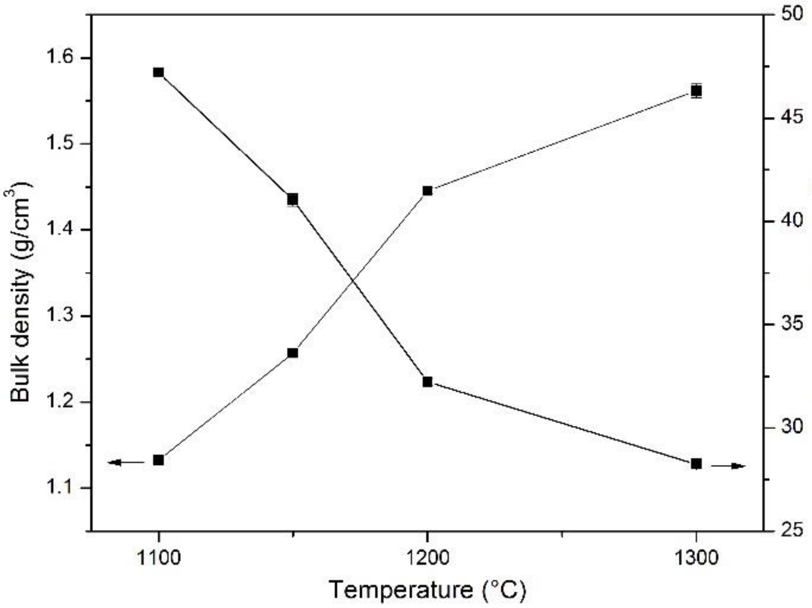
การสลายตัวทางความร้อนของแป้งข้าวเหนียว แสดงดังรูปที่ 4.27 พบว่าที่อุณหภูมิ 125.2 องศาเซลเซียส เกิดปฏิกิริยาดูดความร้อนเนื่องจากการสลายตัวของน้ำในโครงสร้าง และที่อุณหภูมิ 512.9 องศาเซลเซียส เกิดปฏิกิริยาคายความร้อนเนื่องจากการสลายตัวของแป้งเกิดเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ และแป้งข้าวเหนียวซึ่งเป็นสารประกอบอินทรีย์สามารถสลายตัวได้หมดที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส โดยมีปริมาณของส่วนที่ตกค้างอยู่น้อยกว่าร้อยละ 0.54 ซึ่งไม่มีผลต่อการเผาผนึกของชิ้นงาน



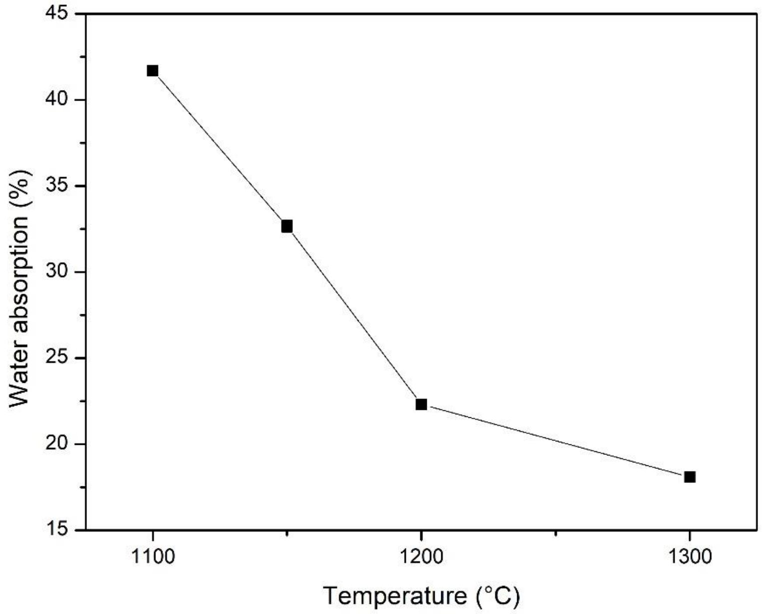
รูปที่ 4.27 กราฟแสดง TG/DTA ของแป้งข้าวเหนียว

4.3.1.3 ความหนาแน่น ความพรุนตัว และการดูดซึมน้ำ

ค่าความหนาแน่นและความพรุนตัวของชิ้นงานฟิวส์ซิลิกาที่มีปริมาณแป้งข้าวเหนียวร้อยละ 7 โดยน้ำหนัก ที่เผาที่อุณหภูมิ 900 ถึง 1300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แสดงดังรูปที่ 4.28 เนื่องจากแป้งข้าวเหนียวเป็นสารประกอบอนินทรีย์จึงเกิดการสลายตัวได้ที่อุณหภูมิประมาณ 600 องศาเซลเซียส และชิ้นงานที่เผาที่อุณหภูมิต่ำกว่า 1100 องศาเซลเซียสยังไม่เกิดการเชื่อมประสานกันของอนุภาคจึงทำให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงต่ำและไม่สามารถวิเคราะห์ความหนาแน่นและความพรุนตัวด้วยเทคนิคอาร์คีมิดิสได้ ดังนั้นจึงทำการศึกษาที่อุณหภูมิ 1100 ถึง 1300 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้นจาก 1.13 ไปเป็น 1.56 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และค่าความพรุนตัวลดลงจากร้อยละ 47.22 ไปเป็น 28.23 ในทางเดียวกันค่าร้อยละการดูดซึมน้ำลดลงจากร้อยละ 47.69 ไปเป็น 18.08 แสดงดังรูปที่ 4.29



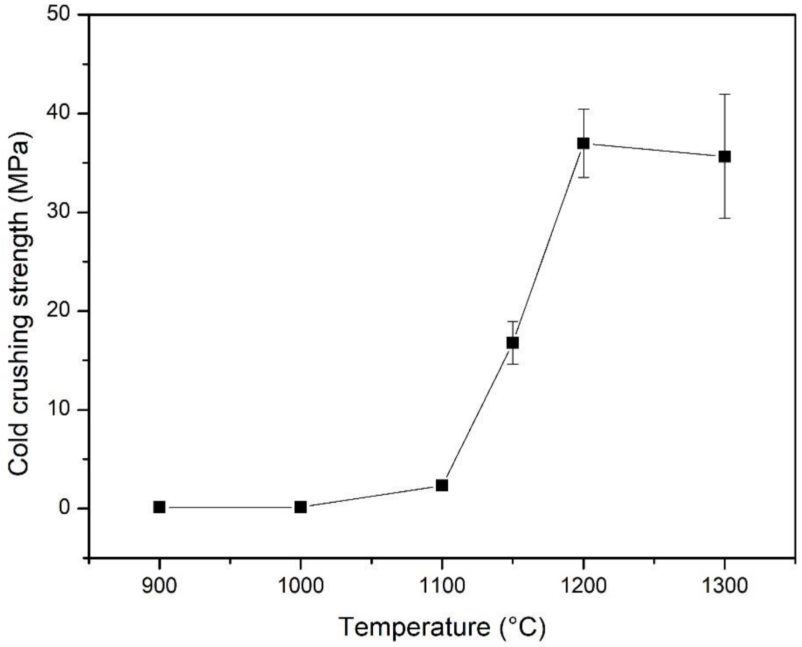
รูปที่ 4.28 ความหนาแน่น และความพรุนตัวของชิ้นงานหลังเผาที่มีปริมาณแป้งข้าวเหนียวร้อยละ 7 โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.29 การดูดซึมน้ำของชิ้นงานหลังเผาที่มีปริมาณแป้งข้าวเหนียวร้อยละ 7 โดยน้ำหนัก

4.3.1.4 ความแข็งแรงหลังเผา

ความแข็งแรงต่อแรงอัดของชิ้นงานฟิวส์ซิลิกาที่มีปริมาณแป้งข้าวเหนียวร้อยละ 7 โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 900 ถึง 1300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แสดงดังรูปที่ 4.30 พบว่าค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจาก 0.15 ไปเป็น 0.40 เมกะพาสคัล เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 900 ถึง 1100 องศาเซลเซียส และค่าความแข็งแรงจะเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเป็น 36.98 เมกะพาสคัล เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 1200 องศาเซลเซียส เมื่อเพิ่มอุณหภูมิถึง 1300 องศาเซลเซียสค่าความแข็งแรงมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยเนื่องจากการเปลี่ยนเฟสเป็นคริสโตบาไลต์

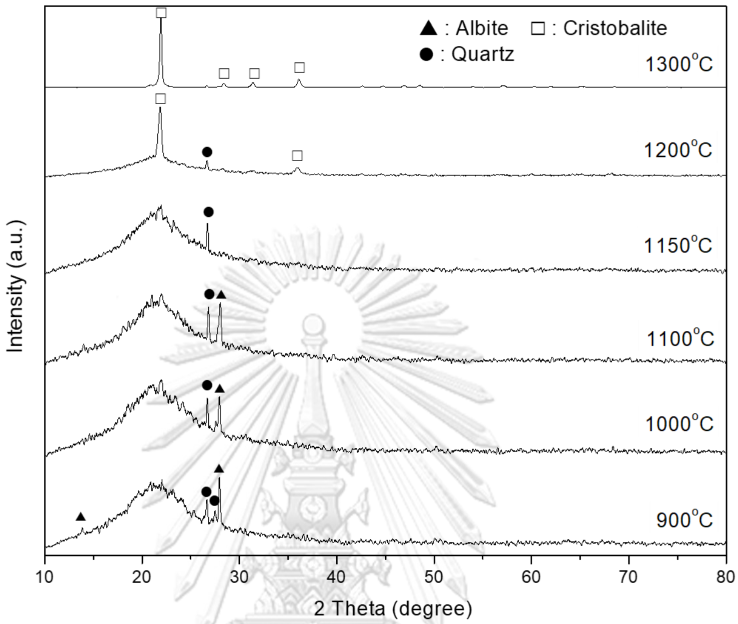


รูปที่ 4.30 ความแข็งแรงของชิ้นงานหลังเผาที่มีปริมาณแป้งข้าวเหนียวร้อยละ 7 โดยน้ำหนัก

4.3.1.5 องค์ประกอบเฟสของชิ้นงานหลังเผา

เมื่อพิจารณาองค์ประกอบเฟสของชิ้นงานฟิวส์ซิลิกาที่มีปริมาณแป้งข้าวเหนียวร้อยละ 7 โดยน้ำหนัก ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 900 ถึง 1300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ดังรูปที่ 4.31 พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 900 ถึง 1150 องศาเซลเซียสยังพบเฟสของโครงสร้างอสัญฐานของฟิวส์ซิลิกาซึ่งเป็นวัตถุดิบหลัก และเฟสของคริสโตบาไลต์เริ่มเกิดที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส และเห็นชัดเจนขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 1300 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากการเปลี่ยนเฟสของของ

คริสโตบาไลต์จากบีตาไปเป็นแอลฟา ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงทางปริมาตรสูงเมื่อเย็นตัวลง ซึ่งอาจเกิดรอยแตกระดับจุลภาคที่ส่งผลทำให้ความแข็งแรงของชิ้นงานลดลง แสดงดังรูปที่ 4.30

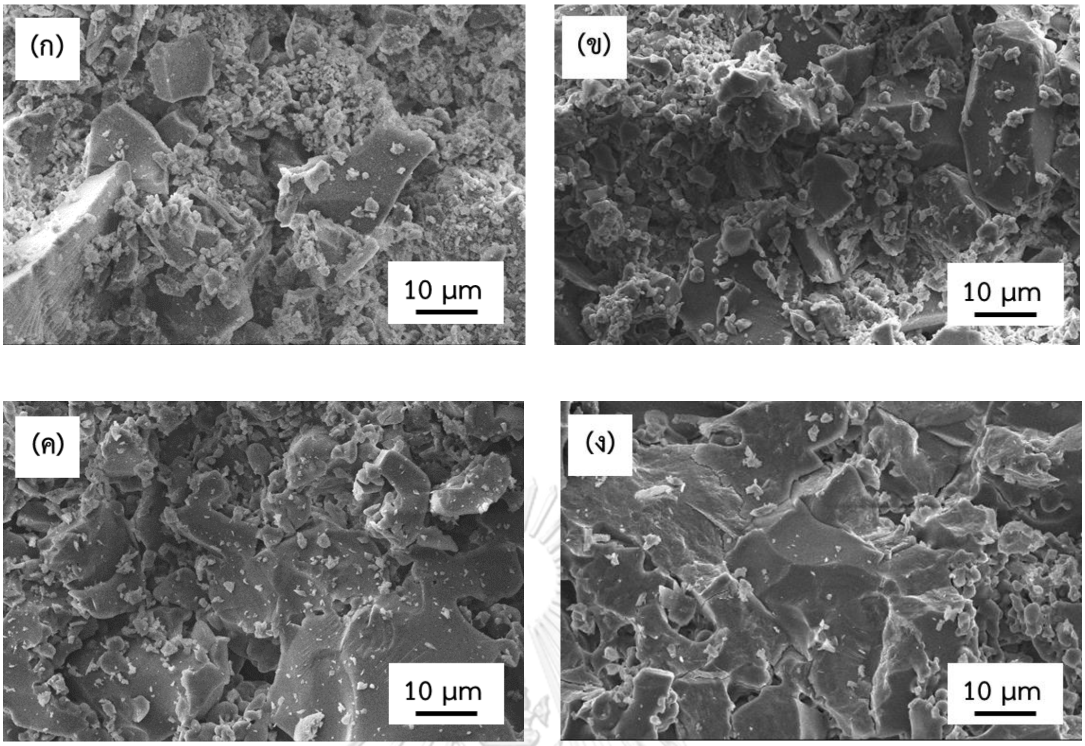


รูปที่ 4.31 องค์ประกอบเฟสของของชิ้นงานที่มีปริมาณแป้งข้าวเหนียวร้อยละ 7 โดยน้ำหนัก

4.3.1.6 โครงสร้างจุลภาค

นำชิ้นงานที่มีปริมาณแป้งข้าวเหนียวร้อยละ 7 โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1100 ถึง 1300 องศาเซลเซียสที่ผ่านการทดสอบความแข็งแรงแล้วมาตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 1500 เท่า แสดงดังรูปที่ 4.32 พบว่าเมื่ออุณหภูมิการเผาเพิ่มขึ้นส่งผลให้อนุภาคของฟิวส์ซิลิกาเชื่อมประสานกันได้ดีขึ้นโดยสังเกตจากเกรนที่มีขนาดใหญ่ขึ้น

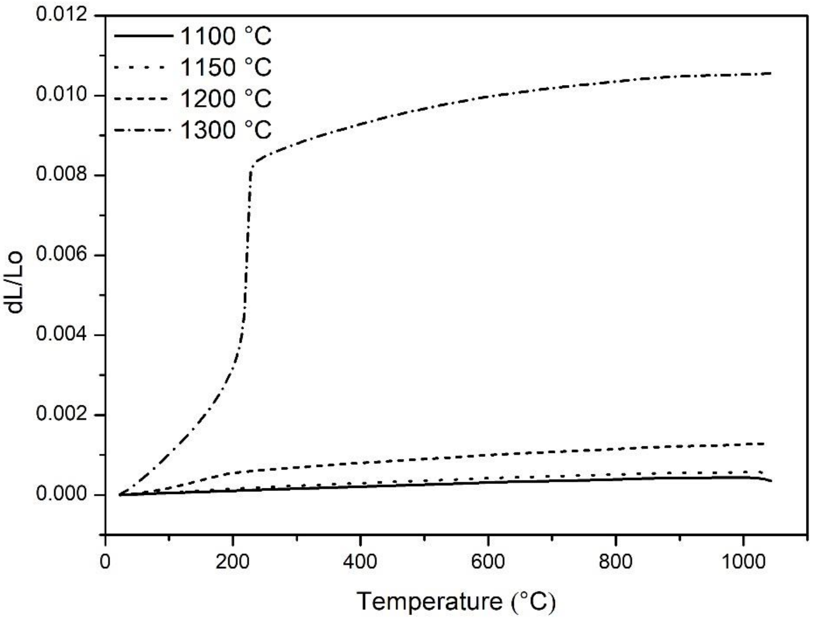
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 4.32 โครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 1500 เท่า ของชิ้นงานที่มีปริมาณแป้งข้าวเหนียว ร้อยละ 7 โดยน้ำหนักที่อุณหภูมิ (ก) 1100 ℃ (ข) 1150 ℃ (ค) 1200 ℃ (ง) 1300 ℃

4.3.1.7 สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน

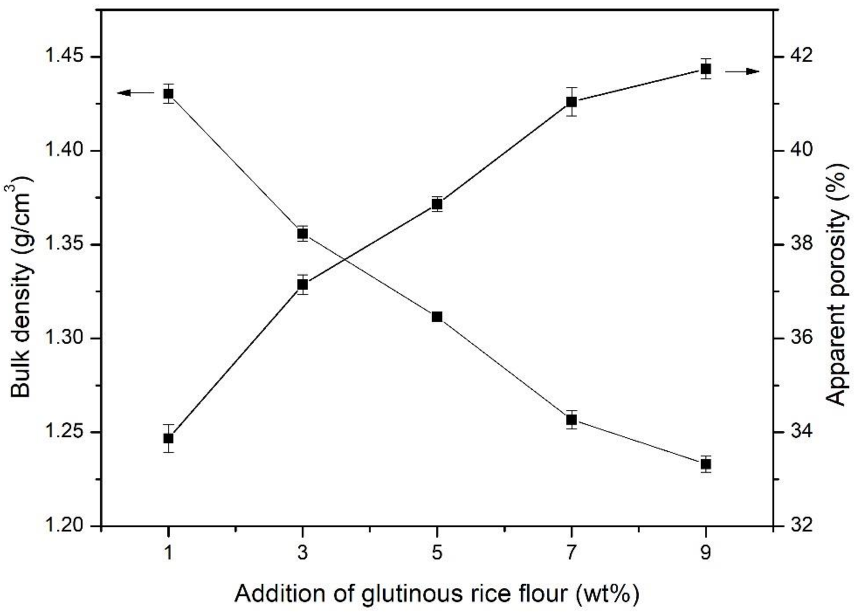
สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนของชิ้นงานที่มีปริมาณแป้งข้าวเหนียวร้อยละ 7 ผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่างกัน แสดงดังรูปที่ 4.33 พบว่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 1000 องศาเซลเซียส ของชิ้นงานที่เผาที่อุณหภูมิ 1100 1150 1200 และ 1300 องศาเซลเซียส มีค่า 0.44×10^{-6} $℃^{-1}$ 0.58×10^{-6} $℃^{-1}$ 1.29×10^{-6} $℃^{-1}$ และ 10.75×10^{-6} $℃^{-1}$ ตามลำดับ สำหรับชิ้นงานที่เผาที่อุณหภูมิ 1300 องศาเซลเซียส สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 230 องศาเซลเซียส มีค่า 40.22×10^{-6} $℃^{-1}$ และในช่วงอุณหภูมิ 230 ถึง 1000 องศาเซลเซียส มีค่า 2.77×10^{-6} $℃^{-1}$ จะเห็นว่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิ 25 ถึง 230 องศาเซลเซียส เนื่องจากการเปลี่ยนเฟสของคริสโตบาไลต์จากแอลฟาไปเป็นบีตา ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงทางปริมาตรสูง



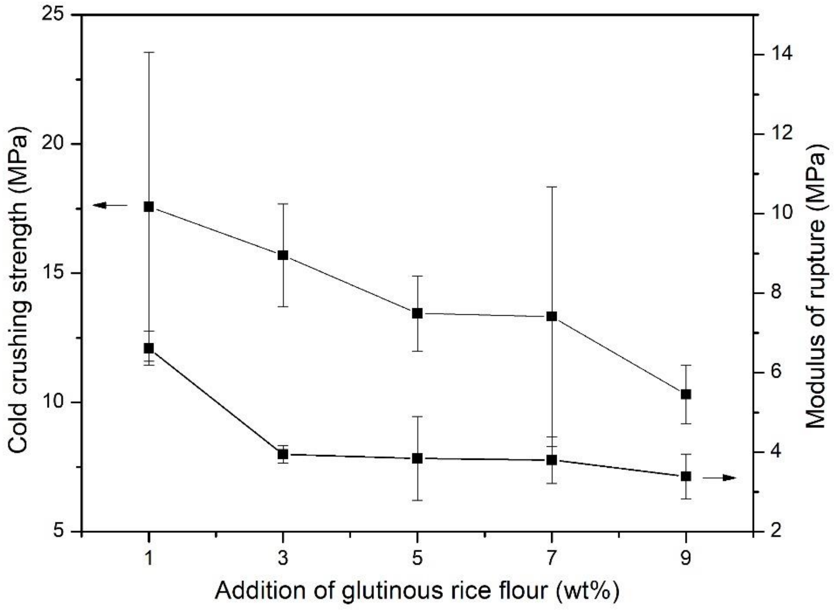
รูปที่ 4.33 การขยายตัวเนื่องจากความร้อนของชิ้นงานที่มีปริมาณแป้งข้าวเหนียว ร้อยละ 7 ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่างกัน

4.3.1.8 ผลของปริมาณแป้งข้าวเหนียวต่อสมบัติของชิ้นงานหลังเผา

ผลของปริมาณแป้งข้าวเหนียวร้อยละ 1 ถึง 9 โดยน้ำหนักต่อสมบัติต่าง ๆ ของชิ้นงานหลังเผาที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียส ซึ่งชิ้นงานที่เผาที่ 1150 องศาเซลเซียสมีความแข็งแรงสูง และยังมีโครงสร้างอสัญฐานของฟิวส์ซิลิกา โดยผลของความหนาแน่นและความพรุนตัวแสดงดังรูปที่ 4.34 พบว่าเมื่อปริมาณของแป้งข้าวเหนียวเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 1 เป็นร้อยละ 9 ค่าความหนาแน่นลดลงจาก 1.43 ไปเป็น 1.23 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และร้อยละความพรุนตัวเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 33.87 ไปเป็น 41.74 ซึ่งความพรุนตัวที่เพิ่มขึ้นจากการสลายตัวของปริมาณแป้งข้าวเหนียวสอดคล้องกับความแข็งแรงแสดงดังรูปที่ 4.35 พบว่าปริมาณแป้งข้าวเหนียวที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความแข็งแรงต่อแรงอัดและความแข็งแรงต่อแรงดัดของชิ้นงานหลังเผาลดลงจาก 17.58 ไปเป็น 10.31 เมกะพาสคัล และจาก 6.61 ไปเป็น 3.39 เมกะพาสคัล ตามลำดับ



รูปที่ 4.34 ความหนาแน่นและร้อยละความพรุนตัวของชิ้นงานที่มีปริมาณแป้งข้าวเหนียวต่างกัน เผาที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.35 ความแข็งแรงต่อแรงกดและความแข็งแรงต่อแรงดัดของชิ้นงานที่มีปริมาณแป้งข้าวเหนียวต่างกันเผาที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียส

จากการศึกษาผลของปริมาณของแป้งข้าวเหนียวต่อสมบัติต่าง ๆ ที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงานเซรามิกซิลิกาพรุน พบว่าชิ้นงานที่ใช้แป้งข้าวเหนียวเป็นตัวเชื่อมประสานร้อยละ 7 โดยน้ำหนัก เป็นชิ้นงานที่มีความแข็งแรงต่อแรงดัดก่อนเผาสูงที่สุด และเมื่อเผาที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียส ชิ้นงานมีความแข็งแรงต่อแรงอัดสูง 16.78 เมกะพาสคัล ซึ่งเหมาะสมที่จะนำมาเตรียมผลิตภัณฑ์ตัวอย่าง เนื่องจากมีสมบัติใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์ทางการค้า และเป็นอุณหภูมิที่ต่ำที่สุดและใช้ปริมาณตัวเชื่อมประสานน้อยที่สุดโดยที่มีความแข็งแรงใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์ทางการค้า และยังคงมีพีคของโครงสร้างอสัญฐานของฟิวส์ซิลิกาอยู่ ทำให้มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนที่ต่ำกว่าผลิตภัณฑ์ทางการค้า

4.4 การเปรียบเทียบสมบัติของชิ้นงานที่ใช้ชนิดของตัวเชื่อมประสานต่างกัน

4.4.1 การเปรียบเทียบสมบัติของชิ้นงานกับแม่แบบสำหรับผลิตกระจกหลอมที่ใช้งานในปัจจุบัน

จากการศึกษาผลของชนิดและปริมาณของตัวเชื่อมประสานต่อสมบัติต่าง ๆ ที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงานเซรามิกซิลิกาพรุน โดยตัวเชื่อมประสานแบ่งออกเป็นตัวเชื่อมประสานอนินทรีย์ ได้แก่ ปูนซีเมนต์อะลูมินาสูง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาว และตัวเชื่อมประสานอินทรีย์ ได้แก่ แป้งข้าวเหนียว โดยชิ้นงานที่ใช้ปูนซีเมนต์อะลูมินาสูงเป็นตัวเชื่อมประสานร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ชิ้นงานที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และชิ้นงานที่ใช้แป้งข้าวเหนียวร้อยละ 7 โดยน้ำหนัก เป็นชิ้นงานที่เหมาะสมที่จะนำมาเตรียมผลิตภัณฑ์ตัวอย่าง เนื่องจากเมื่อพิจารณาชิ้นงานที่ใช้ปูนซีเมนต์อะลูมินาสูงเป็นตัวเชื่อมประสานร้อยละ 10 โดยน้ำหนักพบว่าชิ้นงานมีความหนาแน่นของชิ้นงานใกล้เคียงกันในช่วง 1.14 ถึง 1.19 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 700 ถึง 1200 องศาเซลเซียส และการเผาที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิที่ต่ำที่สุดและใช้ปริมาณตัวเชื่อมประสานน้อยที่สุดโดยที่มีความแข็งแรงใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์ทางการค้า และยังคงมีพีคของโครงสร้างอสัญฐานของฟิวส์ซิลิกาอยู่ ทำให้มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนที่ต่ำกว่าผลิตภัณฑ์ทางการค้า สำหรับชิ้นงานที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวร้อยละ 5 โดยน้ำหนักพบว่าการเผาที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียสเป็นอุณหภูมิที่ต่ำที่สุดและมีความแข็งแรงสูงสุดที่ใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์ทางการค้า โดยยังคงมีพีคของโครงสร้างอสัญฐานของฟิวส์ซิลิกาอยู่ สำหรับชิ้นงานที่ใช้แป้งข้าวเหนียวร้อยละ 7 โดยน้ำหนักเป็นปริมาณที่มีความแข็งแรงก่อนเผาสูงที่สุดที่สามารถเคลื่อนย้ายชิ้นงานได้ง่าย เมื่อ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ทำการเผาที่อุณหภูมิ 900 ถึง 1300 องศาเซลเซียส พบว่าอุณหภูมิต่ำที่สุดที่ชิ้นงานมีความแข็งแรงเหมาะสมคือที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียส

การเปรียบเทียบสมบัติของชิ้นงานกับแม่แบบสำหรับผลิตกระจกหลอมทางการค้าที่ใช้งานในปัจจุบันแสดงดังตารางที่ 4.2 พบว่าชิ้นงานที่มีปริมาณปูนซีเมนต์อะลูมินาสูงร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ชิ้นงานที่มีปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และชิ้นงานที่มีปริมาณแป้งข้าวเหนียวร้อยละ 7 โดยน้ำหนัก มีสมบัติต่างๆใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์ทางการค้า คือ มีค่าความหนาแน่น 1.17 1.31 และ 1.26 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ ค่าความพรุนตัวร้อยละ 49.60 42.40 และ 41.04 ตามลำดับ ความต้านทานต่อแรงกด 5.76 5.29 และ 16.78 ตามลำดับ สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน 2.26 x 10^{-6} °C^{-1} 2.62 x 10^{-6} °C^{-1} และ 0.58 x 10^{-6} °C^{-1} ตามลำดับ

ตารางที่ 4.2 สมบัติของชิ้นงานกับแม่แบบสำหรับผลิตกระจกหลอมที่ใช้งานในปัจจุบัน

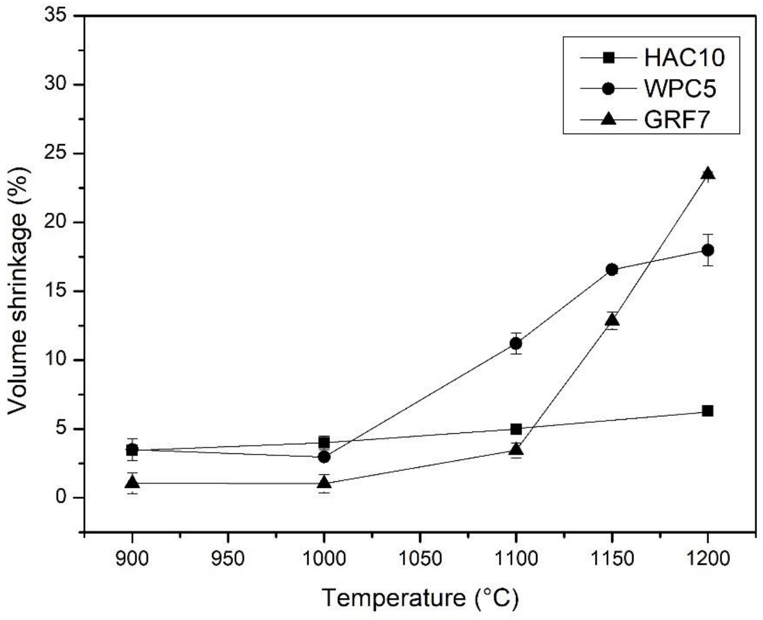
สมบัติ	แบบหล่อ ทางการค้า	HAC10 (1100 °C)	WPC5 (1150 °C)	GRF7 (1150 °C)
ความหนาแน่น (g/cm^3)	1.12±0.01	1.17±0.01	1.31±0.01	1.26±0.01
ความพรุนตัว (%)	52.27±0.49	49.60±0.17	42.40±0.43	41.04±0.30
ความต้านทานต่อแรงกด (MPa)	4.70	5.76	5.29	16.78
สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน (x10^{-6} °C^{-1})	3.12	2.26	2.62	0.58

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.4.2 ร้อยละการหดตัว

การหดตัวเชิงปริมาตรของชิ้นงานที่ใช้ตัวเชื่อมประสานชนิดต่าง ๆ และอุณหภูมิต่างกัน แสดงดังรูปที่ 4.36 พบว่าการหดตัวของชิ้นงานที่มีปริมาณปูนซีเมนต์อะลูมินาสูงร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก เพิ่มขึ้นเล็กน้อยจากร้อยละ 3 ถึง 6 เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 900 ถึง 1200 องศาเซลเซียส การหดตัวของชิ้นงานที่มีปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เพิ่มขึ้นเล็กน้อยจากร้อยละ 2 ถึง 3 เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 900 ถึง 1000

องศาเซลเซียส และเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเป็นร้อยละ 18 เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึง 1200 องศาเซลเซียส การหดตัวของชิ้นงานที่มีปริมาณแป้งข้าวเหนียวร้อยละ 7 โดยน้ำหนัก เพิ่มขึ้นเล็กน้อยจากร้อยละ 1 ถึง 3 เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 900 ถึง 1100 องศาเซลเซียส และเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเป็นร้อยละ 23 เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึง 1200 องศาเซลเซียส ซึ่งสำหรับการใช้งานเป็นแบบหล่อชิ้นงานควรจะมีค่าการหดตัวต่ำเพื่อหลีกเลี่ยงการแตกร้าวจากการขึ้นรูปชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่

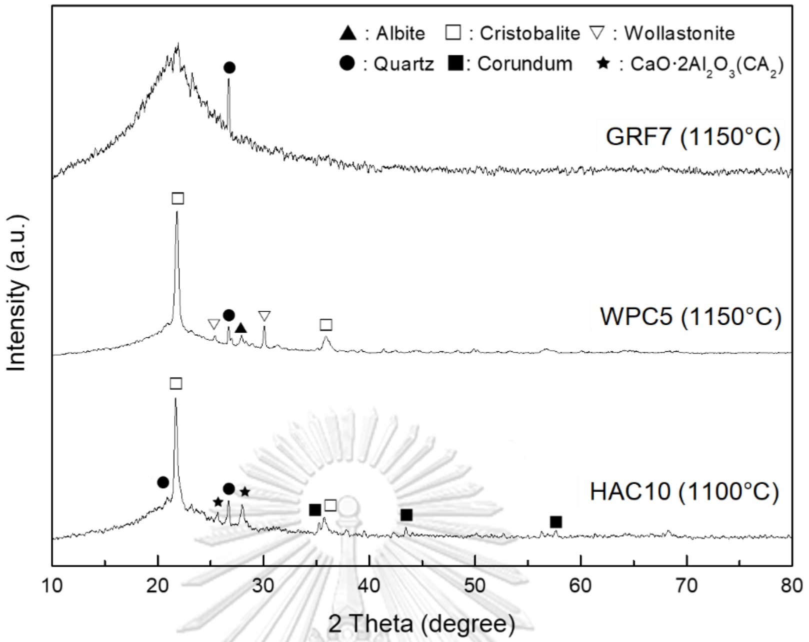


รูปที่ 4.36 การหดตัวเชิงปริมาตรของชิ้นงานที่ปริมาณตัวเชื่อมประสานและอุณหภูมิต่างกัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.4.3 องค์ประกอบเฟส

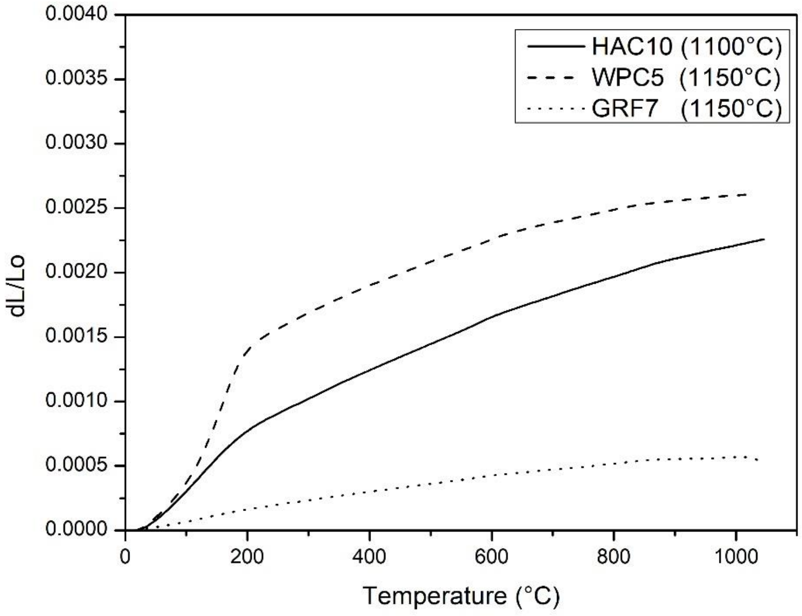
องค์ประกอบเฟสของชิ้นงานที่มีปริมาณปูนซีเมนต์อะลูมินาสูงร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และแป้งข้าวเหนียวร้อยละ 7 โดยน้ำหนัก เผาที่อุณหภูมิ 1100 1150 และ 1150 องศาเซลเซียส ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.37 พบว่า ชิ้นงานที่มีปริมาณปูนซีเมนต์อะลูมินาสูงร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก เผาที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส มีเฟสของคริสโตบาไลต์เป็นเฟสหลักแต่ยังคงมีโครงสร้างอสัณฐานของซิลิกาอยู่ เช่นเดียวกันกับชิ้นงานที่มีปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เผาที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียส ในทางตรงกันข้ามชิ้นงานที่มีปริมาณแป้งข้าวเหนียวร้อยละ 7 โดยน้ำหนัก เผาที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียส พบโครงสร้างอสัณฐานของซิลิกาเป็นเฟสหลัก



รูปที่ 4.37 องค์ประกอบเฟสของชิ้นงานที่ปริมาณตัวเชื่อมประสานและอุณหภูมิต่างกัน

4.4.4 การขยายตัวเนื่องจากความร้อน

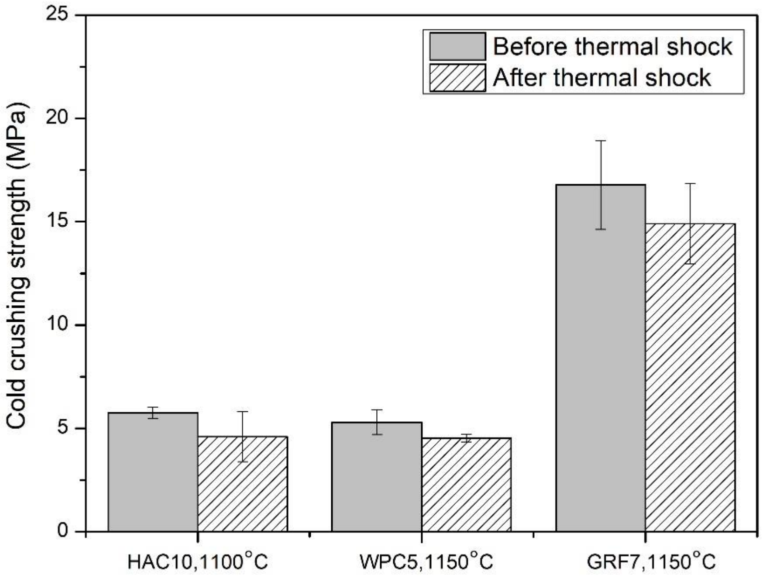
สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนของชิ้นงานที่มีปริมาณปูนซีเมนต์อะลูมินาสูงร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และแป้งข้าวเหนียวร้อยละ 7 โดยน้ำหนัก เผาที่อุณหภูมิ 1100 1150 และ 1150 องศาเซลเซียส ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.38 พบว่าชิ้นงานดังกล่าวมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน ในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 1000 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิในช่วงการขึ้นรูปกระจกหลอม คือ 2.26×10^{-6} $^{o}C^{-1}$ 2.62×10^{-6} $^{o}C^{-1}$ และ 0.58×10^{-6} $^{o}C^{-1}$ ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าที่ใกล้เคียงกับแบบหล่อตัวอย่างซึ่งมีค่าเท่ากับ 3.12×10^{-6} $^{o}C^{-1}$ จะเห็นได้ว่าชิ้นงานที่มีปริมาณแป้งข้าวเหนียวร้อยละ 7 โดยน้ำหนัก เผาที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียสมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนที่ต่ำมาก เนื่องจากชิ้นงานยังไม่เปลี่ยนเฟสเป็นคริสโตบาไลต์ แต่สำหรับชิ้นงานที่มีปริมาณปูนซีเมนต์อะลูมินาสูงร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก เผาที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส และชิ้นงานที่มีปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เผาที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียส มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น และชนิดของตัวเชื่อมประสานที่ต่างกันทำให้เกิดการเปลี่ยนเฟสเป็นคริสโตบาไลต์ และปริมาณของโครงสร้างอสัณฐานลดลง



รูปที่ 4.38 การขยายตัวเนื่องจากความร้อนของชิ้นงานที่ปริมาณตัวเชื่อมประสานและอุณหภูมิต่างกัน

4.4.5 ความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลัน

เมื่อทำการทดสอบความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลันของชิ้นงานที่มีปริมาณปูนซีเมนต์อะลูมินาสูงร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และแป้งข้าวเหนียวร้อยละ 7 โดยน้ำหนัก เผาที่อุณหภูมิ 1100 1150 และ 1150 องศาเซลเซียส ตามลำดับ พบว่าหลังจากนำชิ้นงานเข้าเตาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที จำนวน 5 รอบ ไม่พบรอยแตกร้าวบนชิ้นงานทั้ง 3 ชนิด หลังจากนั้นจึงนำชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลันมาวัดค่าความแข็งแรง แสดงดังรูปที่ 4.39 พบว่าชิ้นงานที่มีปริมาณปูนซีเมนต์อะลูมินาสูงร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ชิ้นงานที่มีปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และชิ้นงานที่มีปริมาณแป้งข้าวเหนียวร้อยละ 7 โดยน้ำหนัก มีค่าความแข็งแรงลดลงเล็กน้อย โดยชิ้นงานมีค่าความแข็งแรงลดลงร้อยละ 20.31 14.37 และ 11.20 ตามลำดับ



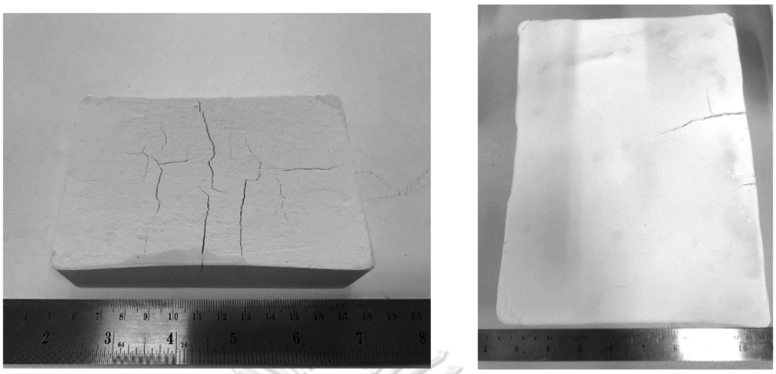
รูปที่ 4.39 ความแข็งแรงหลังการทดสอบความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลัน

4.5 การศึกษาการขึ้นรูปชิ้นงานขนาดใหญ่เพื่อใช้เป็นแบบหล่อสำหรับการผลิตกระจกหลอม

สำหรับการขึ้นรูปชิ้นงานขนาดใหญ่การหดตัวของชิ้นงานมีผลอย่างมากต่อชิ้นงานหลังเผา โดยชิ้นงานที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวเป็นตัวเชื่อมประสานเมื่อเริ่มมีการเผาผนึกชิ้นงานจะมีการหดตัวเชิงปริมาตรสูง นอกจากนี้ยังพบเฟสของคริสโตบาไลต์ชัดเจนทำให้มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนสูงกว่าชิ้นงานที่ใช้ปูนซีเมนต์อะลูมินาสูงเป็นตัวเชื่อมประสาน ทำให้เมื่อขึ้นรูปเป็นชิ้นงานขนาดใหญ่ พบรอยแตกบนชิ้นงานหลังเผา แสดงดังรูปที่ 4.40 (ก) และชิ้นงานที่ใช้แป้งข้าวเหนียวเป็นตัวเชื่อมประสาน ถึงแม้ว่าชิ้นงานที่ใช้แป้งข้าวเหนียวเป็นตัวเชื่อมประสานจะมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนที่ต่ำเนื่องจากเฟสโครงสร้างอสัณฐานของซิลิกา แต่มีการหดตัวเชิงปริมาตรสูงเช่นเดียวกับชิ้นงานที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวเป็นตัวเชื่อมประสาน ส่งผลให้เมื่อเตรียมเป็นชิ้นงานขนาดใหญ่เกิดรอยแตกหลังเผา แสดงรูปที่ 4.40 (ข) สำหรับชิ้นงานที่ใช้ปูนซีเมนต์อะลูมินาสูงมีการหดตัวเชิงปริมาตรต่ำจึงเหมาะสมที่จะนำมาขึ้นรูปชิ้นงานขนาดใหญ่

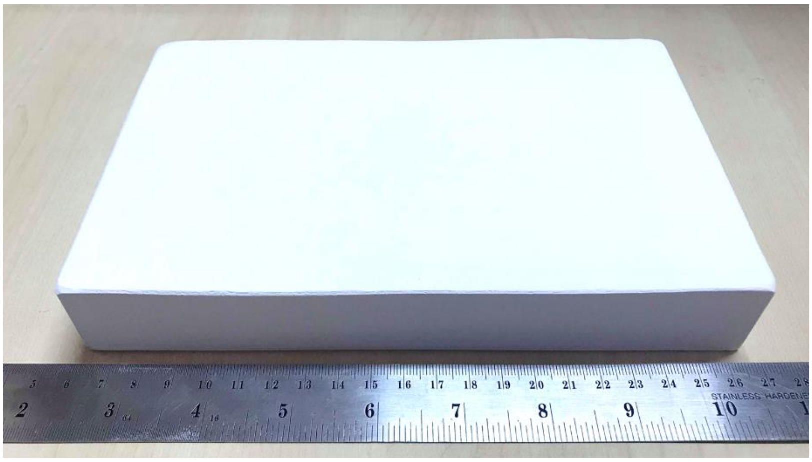
นำชิ้นงานทดสอบที่มีปริมาณปูนซีเมนต์อะลูมินาสูงร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก มาผ่านกระบวนการขึ้นรูปกระจกหลอมที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสแสดงดังรูปที่ 4.41 พบว่าชิ้นงานไม่เกิดรอยแตกร้าว และสำหรับการขึ้นรูปเป็นชิ้นงานขนาดใหญ่ หลังจากชิ้นงานแข็งตัวพบว่าชิ้นงานมีความแข็งแรงก่อนเผาที่สามารถเคลื่อนย้ายได้และไม่พบรอยแตกร้าวที่ผิวของชิ้นงาน ทำการเผา

ชิ้นงานที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส เนื่องจากเป็นอุณหภูมิที่มีความแข็งแรงใกล้เคียงกับแบบหล่อตัวอย่าง พบว่าชิ้นงานที่ได้ไม่เกิดการเสียรูปร่างและไม่มีรอยแตกร้าวเกิดขึ้นแสดงดังรูปที่ 4.42



รูปที่ 4.40 (ก) ชิ้นงานขนาดใหญ่ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และ
(ข) แป้งข้าวเหนียวร้อยละ 7 โดยน้ำหนัก เป็นตัวเชื่อมประสาน เผาที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียส

รูปที่ 4.41 ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปกระจกหลอม



รูปที่ 4.42 ชิ้นงานขนาดใหญ่ที่มีปริมาณปูนซีเมนต์อะลูมินาสูงร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก
เผาที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาการขึ้นรูปเซรามิกซิลิกาพรุนด้วยวิธีการหล่อแบบเพื่อใช้เป็นแบบหล่อสำหรับขึ้นรูปกระจกหลอม จากฟิวส์ซิลิกาซึ่งเป็นของเสียในกระบวนการผลิตเบ้าหลอมฟิวส์ซิลิกา โดยทำการศึกษาถึงผลของชนิดและปริมาณของตัวเชื่อมประสาน ต่อสมบัติของแบบหล่อก่อนเผาและหลังเผา โดยสรุปดังต่อไปนี้

1. ชิ้นงานที่ใช้ปูนซีเมนต์อะลูมินาสูงเป็นตัวเชื่อมประสาน เมื่อปริมาณปูนซีเมนต์อะลูมินาสูงเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความหนาแน่นมีค่าสูงขึ้น ความแข็งแรงของชิ้นงานลดลงและเร่งให้เกิดเฟสคริสโตบาไลต์มากขึ้น โดยชิ้นงานที่มีปูนซีเมนต์อะลูมินาสูงเป็นตัวประสานร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก เผาที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส เป็นปริมาณตัวประสานที่น้อยที่สุดและอุณหภูมิต่ำสุดที่มีความแข็งแรงใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์ทางการค้า โดยมีความหนาแน่น 1.17 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ความพรุนตัวร้อยละ 49.60 ความแข็งแรง 5.76 เมกะพาสคัล และสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน 2.26×10^{-6} $^{\circ}C^{-1}$
2. ชิ้นงานที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวเป็นตัวเชื่อมประสาน เมื่อเติมปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวเพิ่มขึ้น ทำให้ความหนาแน่นและความแข็งแรงของชิ้นงานเพิ่มขึ้นเล็กน้อย นอกจากนี้การเติมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวเพิ่มมากขึ้นยังส่งผลให้พบเฟสโวลลาสโทไนต์เพิ่มมากขึ้น โดยชิ้นงานที่มีปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวเป็นตัวประสานร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เผาที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียสมีค่าความแข็งแรงสูงที่สุดและใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์ทางการค้า โดยมีความหนาแน่น 1.31 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ความพรุนตัวร้อยละ 42.40 ความแข็งแรง 5.29 เมกะพาสคัล และสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน 2.62×10^{-6} $^{\circ}C^{-1}$
3. ชิ้นงานที่ใช้แป้งข้าวเหนียวเป็นตัวเชื่อมประสาน เมื่อปริมาณแป้งข้าวเหนียวเพิ่มขึ้น ทำให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงก่อนเผาเพิ่มขึ้นและปริมาณแป้งข้าวเหนียวร้อยละ 7 โดยน้ำหนักมีความแข็งแรงก่อนเผาสูงที่สุด และเมื่อเผาที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียสชิ้นงานมีความหนาแน่น 1.26 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ความพรุนตัวร้อยละ 41.04 มีความแข็งแรงสูง 16.78 เมกะพาสคัล โดยยังคงมีโครงสร้างอสัณฐานของซิลิกาและมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนที่ต่ำเท่ากับ 0.58×10^{-6} $^{\circ}C^{-1}$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

4. การศึกษาการขึ้นรูปชิ้นงานขนาดใหญ่เพื่อใช้เป็นแบบหล่อสำหรับการผลิตกระจกหลอม พบว่าชิ้นงานที่มีปริมาณปูนซีเมนต์อะลูมินาสูงเป็นตัวประสานร้อยละ 10 โดยน้ำหนักเผาที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส เหมาะสมที่จะนำมาเตรียมแบบหล่อ เนื่องจากมีสมบัติใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์ทางการค้าและมีการหดตัวเชิงปริมาตรที่ต่ำ

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาอัตราการเพิ่มอุณหภูมิของชิ้นงานขนาดใหญ่ต่อสมบัติของชิ้นงานที่ได้
2. ขึ้นรูปชิ้นงานที่มีขนาดเท่ากับผลิตภัณฑ์ทางการค้าเพื่อนำไปทดสอบการใช้งานจริงในโรงงานอุตสาหกรรม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

รายการอ้างอิง

1. Worrall, W.E. (1986). Clays and ceramic raw materials. England: Elsevier applied science publishers Ltd.
2. วัชรี ประภาษี. 2561. ซิลิกา[ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://www2.mtec.or.th/th/special/cdm/articles3.html [8 มิถุนายน 2561]
3. Roy, R., Agrawal, D.K., and McKinstry, H.A. 1989. Very low thermal expansion coefficient materials. Annual Review of Materials Science 19: 59-81.
4. Hamer, F. and Hamer, J. (2004). The potter's dictionary of materials and techniques. England: A&C Black Publishers Ltd.
5. Silica - Fused Silica (Silicon Dioxide)[Online]. Avaliable from: https://www.azom.com/properties.aspx?ArticleID=1387 [10 June 2018]
6. Photovoltaic casting crucible[Online]. Avaliable from: https://www.enfsolar.com/directory/material/13506/solar-cera [2017, Jan 17]
7. Chen, Y. and Yi, A.Y. 2011. Design and fabrication of freeform glass concentrating mirrors using a high volume thermal slumping process. Solar Energy Materials and Solar Cells 95: 1654-1664.
8. Su, L., He, P., and Yi, A.Y. 2011. Investigation of glass thickness effect on thermal slumping by experimental and numerical methods. Journal of Materials Processing Technology 211: 1995-2003.
9. Glass slumping process [Online]. Avaliable from: http://www.glass-fusing-made-easy.com/glass-slumping-process.html [13 Jan 2017]
10. ฐิติกา เลิศรัตนานนท์ และ ศีกัญญา ทับแสง. 2554. การเตรียมมอร์ตาร์ทนไฟสำหรับแม่พิมพ์ขึ้นรูปแก้วที่มีความพรุนตัวสูง. โครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์. ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
11. Sarkar, R. (2016). Refractory technology: Fundamentals and applications. United states: CRC Press Taylor&Francis Group.
12. Schacht, C. (2004). Refractories handbook. United states: Marcel Dekker, Inc.
13. Reed, J.S. (1995). Principles of Ceramics Processing. United states: John Wiley & Sons, Inc.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

14. Hu, Y., Wang, Z., and Lu, J. 2008. Study on the gel casting of fused silica glass. Journal of Non-Crystalline Solids 354: 1285-1289.

15. Verma, J., Vijayakumar, M., and Mitra, R. 2015. Processing and microstructure of freeze-cast silica foams. Materials Letters 153: 168-170.

16. Mishra, S., Mitra, R., and Vijayakumar, M. 2010. Structure–property correlation in cellular silica processed through hydrophobized fused silica powder for aerospace application. Journal of Alloys and Compounds 504: 76-82.

17. ปริญญา จินดาประเสริฐ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล. (2555). ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และคอนกรีต. ประเทศไทย: สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย (ส.ค.ท.).

18. นิธิวัชร์ นวอัครฐานันท์. 2556. การเตรียมมอร์ตาร์ทนไฟเป็นแบบหล่อความพรุนตัวสูงสำหรับการผลิตกระจกหลอม. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต. ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

19. Banerjee, S. (1998). Monolitic refractories. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.

20. Wang, Y., Li, X., Zhu, B., and Chen, P. 2016. Microstructure evolution during the heating process and its effect on the elastic properties of CAC-bonded alumina castables. Ceramics International 42: 11355-11362.

21. Alves, H.M., Tarì, G., Fonseca, A.T., and Ferreira, J.M.F. 1998. Processing of porous cordierite bodies by starch consolidation. Materials Research Bulletin 33: 1439-1448.

22. พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และ นิธิยา รัตนาปนนท์. 2561. อะไมโลสและอะไมโลเพคติน [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/0566/amylopectin [8 มิถุนายน 2561]

23. Tester, R.F., Karkalas, J., and Qi, X. 2004. Starch-composition, fine structure and architecture. Journal of Cereal Science 39: 151-165.

24. French, D. CHAPTER VII - ORGANIZATION OF STARCH GRANULES In J.N. Bemiller and E.F. Paschall (ed.), Starch: Chemistry and Technology (Second Edition), 183-247. San Diego: Academic Press, 1984.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

25. Sanson, A., Pinasco, P., and Roncari, E. 2008. Influence of pore formers on slurry composition and microstructure of tape cast supporting anodes for SOFCs. Journal of the European Ceramic Society 28: 1221-1226.

26. Mingyi, L., Bo, Y., Jingming, X., and Jing, C. 2010. Influence of pore formers on physical properties and microstructures of supporting cathodes of solid oxide electrolysis cells. International Journal of Hydrogen Energy 35: 2670-2674.

27. Wan, W., Feng, Y., Yang, J., Xu, S., and Qiu, T. 2015. Preparation of mesoporous silica ceramics with relatively high strength from industrial wastes by low-toxic aqueous gel-casting. Journal of the European Ceramic Society 35: 2163-2170.

28. Lyckfeldt, O. and Ferreira, J.M.F. 1998. Processing of porous ceramics by ‘starch consolidation’. Journal of the European Ceramic Society 18: 131-140.

29. Talou, M.H., Villar, M.A., Camerucci, M.A., and Moreno, R. 2011. Rheology of aqueous mullite–starch suspensions. Journal of the European Ceramic Society 31: 1563-1571.

30. Minatti, J.L., Santana, J.G.A., Fernandes, R.S., and Campos, E. 2009. Alumina developed by pre-gelling starch consolidation (PSC). Journal of the European Ceramic Society 29: 661-668.

31. Ju, C., Wang, Y., Ye, J., and Huang, Y. 2008. Modified-starch consolidation of alumina ceramics. Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed. 23: 558.

32. Khattab, R.M., Wahsh, M.M.S., and Khalil, N.M. 2012. Preparation and characterization of porous alumina ceramics through starch consolidation casting technique. Ceramics International 38: 4723-4728.

33. Gregorová, E., Pabst, W., and Bohačenko, I. 2006. Characterization of different starch types for their application in ceramic processing. Journal of the European Ceramic Society 26: 1301-1309.

34. คฑามาศ นาคกลัด และ ศุภวรรณ กันกง. 2560. การเตรียมผลิตภัณฑ์มัลไลท์-คอร์เดียไรท์ด้วยเทคนิคสตาร์ชคอนโซลิเดชัน. โครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์. ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

35. Wan, W., Huang, C., Yang, J., and Qiu, T. 2014. Study on gelcasting of fused silica glass using glutinous rice flour as binder. International Journal of Applied Glass Science 5: 401-409.

36. Chandradass, J., et al. 2009. Starch consolidation of alumina: Fabrication and mechanical properties. Journal of the European Ceramic Society 29: 2219-2224.

37. Lager, G.A., Jorgensen, J., and Rotella, F. 1982. Crystal structure and thermal expansion of α-quartz SiO_2 at low temperatures. Journal of Applied Physics 53: 6751-6756.

38. Levien, L., Prewitt, C.T., and Weidner, D.J. 1980. Structure and elastic properties of quartz at pressure. American Mineralogist 65: 920-930.

39. Anand, K. and Kishore. 1983. On the wear of aluminium-corundum composites. Wear 85: 163-169.

40. EerNisse, E.P. 1974. Compaction of ion-implanted fused silica. Journal of Applied Physics 45: 167-174.

41. Chekhovskoi, V.Y. and Petrov, V.A. 1963. Melting point of corundum. Measurement Techniques 6: 751-753.

42. Kazemi, A., Faghihi-Sani, M.A., and Alizadeh, H.R. 2013. Investigation on cristobalite crystallization in silica-based ceramic cores for investment casting. Journal of the European Ceramic Society 33: 3397-3402.

43. Liu, S.H., Chen, P., Xu, D.H., and Yuan, Q.D. 2017. Effects of sintering temperature on phases, microstructures and properties of fused silica ceramics. Key Engineering Materials 726: 399-403.

44. Taylor, J.R. and Dinsdale, A.T. 1990. Thermodynamic and phase diagram data for the CaO-SiO_2 system. Calphad 14: 71-88.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 1 ตารางแสดงค่า 2 Theta, intensity และ hkl ของ แอลไบต์ ซึ่งเป็นข้อมูลมาตรฐานจาก 2003 JCPDS-International Center for Diffraction Data หมายเลข JCPDS 00-009-0466

Pattern : 00-009-0466 ***Radiation =*** 1.540600 ***Quality :*** High

$NaAlSi_3O_8$

Sodium Aluminum Silicate
Albite, ordered

Lattice : Anorthic (triclinic)
S.G. : C-1 (0)
Mol. weight = 262.22
Volume [CD] = 332.42

a = 8.14400	***alpha =*** 94.26	***Dx =*** 2.620
b = 12.78700	***beta =*** 116.60	***Dm =*** 2.605
c = 7.16000	***gamma =*** 87.67	
a/b = 0.63690	***Z =*** 4	***I/Icor =*** 2.10
c/b = 0.55994		

General comments: Low temperature structure.
Optical data: A=1.525, B=1.529, Q=1.536, Sign=+, 2V=70°
Color: Colorless, gray, white, bluish
Melting point: 1118°
Sample source or locality: Specimen from Amelia, Virginia, USA.
Analysis: Composition (wt.%): albite 98.2, orthoclase 1.8.
General comments: For variations in 2θ with composition to 50% anorthite see Smith, *Mineral. Mag.*, **31** 47 (1956), also Smith, Yoder, *Am. Mineral.*, **41** 632 (1956).
Additional pattern: To replace 1-739 and validated by calculated pattern 20-554.
Data collection flag: Non ambient temperature.

Smith., Mineral. Mag., volume 31, page 47 (1956)

Radiation : CuKa1
Lambda : 1.54050
SS/FOM : F30= 36(0.0138,60)
Filter : Beta
d-sp : Not given

d (Å)	*i*	*h*	*k*	*l*
6.39000	20	0	0	1
5.94000	2	-1	-1	1
5.59000	2	-1	1	1
4.03000	16	-2	0	1
3.85700	8	1	-1	1
3.78000	25	1	1	1
3.68400	20	1	3	0
3.66300	16	-1	-3	1
3.50900	10	-1	-1	2
3.48400	2	-2	-2	1
3.37500	8	-1	1	2
3.19600	100	0	0	2
3.15100	10	-2	2	0
2.96400	10	1	-3	1
2.93300	16	0	-2	2
2.86600	8	1	3	1
2.84300	2	-1	-3	2
2.78700	2	0	2	2
2.63900	6	-1	3	2
2.56300	8	-2	-4	1
2.53800	2	-3	-1	2
2.51100	2	1	-1	2
2.49600	6	2	-2	1
2.46000	6	2	2	1
2.44300	4	-2	4	1
2.43100	2	-1	-5	1
2.40500	2	2	4	0
2.38800	4	3	1	0
2.32000	4	-3	-3	1
2.27800	2	-1	1	3
2.18900	4	0	4	2
2.12500	8	0	6	0
2.11900	6	-1	-3	3
2.07600	2	2	-4	1
2.03500	2	2	4	1
2.00000	2	2	0	2
1.98000	4	0	6	1
1.92700	2	2	-2	2
1.88900	8	2	2	2
1.85100	2	-4	0	3
1.84400	3	-2	6	1
1.82900	4	-2	6	0
1.82400	18	0	-4	3
1.80400	6	1	1	3
1.78500	8	-2	0	4

ตารางที่ 2 ตารางแสดงค่า 2 Theta, intensity และ hkl ของ ควอตซ์ ซึ่งเป็นข้อมูลมาตรฐานจาก 2003 JCPDS-International Center for Diffraction Data หมายเลข JCPDS 01-086-1630

Pattern : 01-086-1630 ***Radiation =*** 1.540600 ***Quality :*** Alternate

α-SiO_2

Silicon Oxide
Quartz low

Lattice : Hexagonal
S.G. : P3121 (152)
Mol. weight = 60.08
Volume [CD] = 113.06

a = 4.91410
c = 5.40600
Z = 3
Dx = 2.647
I/Icor = 3.02

ICSD collection code: 201354
ICSD space group comment: ICSD SG: P3121S IT is: 152 SG short form: P3121
Temperature factor: ATF
Remarks from ICSD/CSD: REM TEM 296.
Data collection flag: Ambient.

Lager, G.A., Jorgensen, J.D., Rotella, F.J., J. Appl. Phys., volume 53, page 6751 (1982)
Calculated from ICSD using POWD-12++ (1997)

Radiation : CuKa1
Lambda : 1.54060
SS/FOM : F29=1000(0.0001,29)
Filter : Not specified
d-sp : Calculated spacings

2th	***i***	***h***	***k***	***l***
20.856	212	1	0	0
26.636	999	1	0	1
36.541	67	1	1	0
39.462	66	0	1	2
40.286	31	1	1	-1
42.447	50	2	0	0
45.789	27	0	2	1
50.134	111	1	1	-2
50.614	4	0	0	3
54.867	33	2	0	2
55.319	15	1	0	3
57.226	2	1	2	0
59.952	79	2	1	-1
64.026	14	1	1	-3
65.777	3	3	0	0
67.734	48	1	2	-2
68.133	59	0	2	3
68.305	62	3	0	1
73.455	18	0	1	4
75.649	23	0	3	2
77.660	12	2	2	0
79.871	23	2	1	-3
80.032	14	2	2	-1
81.157	20	1	1	-4
81.478	24	3	1	0
83.824	14	3	1	1
84.940	2	0	2	4
87.060	1	2	2	-2
87.431	2	0	3	3

ตารางที่ 3 ตารางแสดงค่า 2 Theta, intensity และ hkl ของ ควอตซ์ ซึ่งเป็นข้อมูลมาตรฐานจาก 2003 JCPDS-International Center for Diffraction Data หมายเลข JCPDS 01-086-1564

Pattern : 01-086-1564 **Radiation =** 1.540598 **Quality :** Alternate

SiO_2

Silicon Oxide
Quartz low

Lattice : Hexagonal
Mol. weight = 60.08
S.G. : P3221 (154)
Volume [CD] = 101.72
a = 4.72219
Dx = 2.943
c = 5.26730
Z = 3
I/Icor = 17.51

ICSD collection code: 100345
ICSD space group comment: ICSD SG: P3221S IT is: 154 SG short form: P3221
Temperature factor: ATF
Remarks from ICSD/CSD: REM PRE 55.8+5 KBAR.
Additional pattern: See PDF 86-1565 and PDF 85-0462.
Data collection flag: Ambient.

Levien, L., Prewitt, C.T., Weidner, D.J., Am. Mineral., volume 65, page 920 (1980)
Calculated from ICSD using POWD-12++ (1997)

Radiation : CuKa1
Filter : Not specified
Lambda : 1.54060
d-sp : Calculated spacings
SS/FOM : F24=118(0.0076,27)

2th	i	h	k	l
21.714	222	1	0	0
27.592	999	0	1	1
38.082	113	1	1	0
40.716	128	1	0	2
41.896	52	1	1	1
44.261	74	2	0	0
47.670	16	0	2	1
51.973	79	1	1	2
*51.973	79	0	0	3
56.970	64	2	0	2
*56.970	64	0	1	3
59.782	3	2	1	0
62.579	91	2	1	1
66.286	22	1	1	3
68.815	1	3	0	0
70.597	80	1	2	2
*70.597	80	2	0	3
71.421	58	0	3	1
75.837	35	1	0	4
79.031	27	3	0	2
81.459	5	2	2	0
83.204	27	2	1	3
83.930	13	2	2	1
84.102	17	1	1	4
85.552	29	3	1	0
88.007	4	1	3	1
88.178	2	2	0	4

ตารางที่ 4 ตารางแสดงค่า 2 Theta, intensity และ hkl ของ คอรันดัม ซึ่งเป็นข้อมูลมาตรฐานจาก 2003 JCPDS-International Center for Diffraction Data หมายเลข JCPDS 00-042-1468

Pattern : 00-042-1468 ***Radiation =*** 1.540600 ***Quality :*** Deleted

Al_2O_3

Aluminum Oxide
Corundum, syn
Also called: alumina, alundum, diamonite

Lattice : Rhombohedral
S.G. : R-3c (167)
a = 4.75880
c = 12.99200
Z = 6

Mol. weight = 101.96
Volume [CD] = 254.80
Dx = 3.987
Dm = 4.050
I/Icor = 1.00

Color: White
Sample source or locality: Sample is the National Institute of Standards and Technology corundum standard reference material 674.
Additional pattern: Validated by calculated pattern 43-1484.
Melting point: 2050°
Optical data: A=1.7604, B=1.7686, Sign=-
Common name: Also called: ruby.
Common name: Also called: sapphire.
Deleted and rejected by: Deleted by 10-173 which is satisfactory.
Data collection flag: Ambient.

Welton-Holzer, J., McCarthy, G., North Dakota State University, Fargo, North Dakota, USA., ICDD Grant-in-Aid (1989)

Radiation : CuKa1
Lambda : 1.54056
SS/FOM : F30=133(0.0073,31)

Filter : Monochromator crystal
d-sp : Diffractometer
Internal standard : Si

2th	*i*	*h*	*k*	*l*
25.577	70	0	1	2
35.151	97	1	0	4
37.785	42	1	1	0
41.685	1	0	0	6
43.363	100	1	1	3
46.184	1	2	0	2
52.559	42	0	2	4
57.504	82	1	1	6
59.765	2	2	1	1
61.135	5	1	2	2
61.305	7	0	1	8
66.522	30	2	1	4
68.209	45	3	0	0
70.432	1	1	2	5
74.309	1	2	0	8
76.882	13	1	0	10
77.244	6	1	1	9
80.442	2	2	1	7
80.695	5	2	2	0
83.237	1	3	0	6
84.369	4	2	2	3
85.137	1	1	3	1
86.359	4	3	1	2
86.502	3	1	2	8
89.000	5	0	2	10
90.740	2	0	0	12
91.193	6	1	3	4
95.251	12	2	2	6
98.410	2	0	4	2
101.067	9	2	1	10
102.850	1	1	1	12
103.334	2	4	0	4
109.509	1	3	2	1
109.855	1	1	2	11
110.820	2	2	3	2
110.998	2	3	1	8
114.092	2	2	2	9
116.105	9	3	2	4
116.594	7	0	1	14
117.843	5	4	1	0
120.216	1	2	3	5
122.053	3	4	1	3
124.602	2	0	4	8
127.683	10	1	3	10
129.894	4	3	0	12
131.125	4	2	0	14
132.244	1	3	2	7
132.677	1	2	1	13
136.101	16	4	1	6

ตารางที่ 5 ตารางแสดงค่า 2 Theta, intensity และ hkl ของ CA ซึ่งเป็นข้อมูลมาตรฐานจาก 2003 JCPDS-International Center for Diffraction Data หมายเลข JCPDS 00-023-1036

Pattern : 00-023-1036 **Radiation =** 1.540600 **Quality :** Questionable

$CaAl_2O_4$
$/CaO{\cdot}Al_2O_3$

Calcium Aluminum Oxide

Lattice : Monoclinic

S.G. : P21/c (14)

Mol. weight = 158.04

Volume [CD] = 1070.40

Dx = 0.245

a = 8.69800

b = 8.09200

c = 15.20800

a/b = 1.07489

c/b = 1.87939

beta = 90.14

Additionnal diffraction line(s): Plus 28 lines to 1.449.
Additional pattern: To replace 1-888 and 34-440.
Data collection flag: Ambient.

Baldock et al., J. Appl. Crystallogr., volume 3, page 188 (1970)

Radiation : CuKa

Lambda : 1.54180

SS/FOM : F30= 19(0.0310,51)

Filter : Beta

d-sp : Not given

d (Å)	i	h	k	l
7.58000	2	0	0	2
7.17000	2	0	1	1
5.93000	2	-1	1	0
5.53000	6	-1	1	1
4.67000	25	1	1	2
4.38000	2	2	0	0
4.35000	2	0	1	3
4.04000	10	0	2	0
3.91000	2	0	2	1
3.85000	2	1	1	3
3.83000	2	2	1	0
3.80000	2	0	0	4
3.77000	2	2	0	2
3.71000	16	2	1	1
3.67000	2	-1	2	0
3.57000	2	0	2	2
3.44000	2	0	1	4
3.42000	6	2	1	2
3.30000	6	1	2	2
3.20000	10	-1	1	4
3.16000	6	0	2	3
3.06000	6	-2	1	3
2.97100	100	1	2	3
2.96600	100	-2	2	0
2.90800	6	-2	2	1
2.87200	6	-2	0	4
2.85900	2	2	0	4
2.85100	10	0	1	5
2.77400	2	0	2	4
2.76100	6	-2	2	2
2.73000	2	3	1	0
2.70300	2	1	1	5
2.68200	2	3	1	1
2.66000	2	0	3	1
2.64200	2	-1	2	4
2.57600	2	1	3	0
2.53400	25	1	3	1
2.51800	35	0	0	6
2.51400	35			
2.43900	6	1	3	2
2.41800	16	0	1	6
2.40400	6	-3	1	3
2.39900	25	3	1	3
2.38400	6	-2	1	5
2.33900	6	-2	2	4
2.32900	10	1	1	6
2.29600	2	1	3	3
2.29200	6	2	3	0
2.26600	6	2	3	1
2.24800	2	3	2	2
2.21900	2	-3	1	4
2.19900	6	0	3	4
2.19400	10	2	3	2
2.17400	2	4	0	0
2.14600	2	0	2	6
2.13300	10	-1	3	4
2.11900	2	2	2	5
2.10800	2	2	1	6
2.10100	6	4	1	0
2.09400	6	-4	0	2
2.08800	6	2	3	3
2.07800	6	4	1	1
2.04100	2	-1	1	7
2.02300	10	0	4	0
2.00500	2	-3	2	4
1.97300	2	-3	3	0
1.96400	2	-2	3	4
1.95800	6	3	3	1
1.94100	6	-4	1	3
1.92600	6	-2	2	6
1.92300	16	2	2	6
1.91400	10	0	2	7
1.90100	2	0	0	8
1.88700	2	2	1	7
1.87000	2	-1	2	7
1.85900	2	-3	1	6
1.85400	2	3	1	6
1.84800	2	0	3	6
1.84100	2	-3	3	3
1.83600	6	1	4	3
1.82900	2	2	3	5
1.80700	2	-1	3	6
1.78500	2	0	4	4
1.75300	2	-2	2	7
1.74900	2	1	4	4
1.73600	2	5	0	0
1.72800	2	-3	2	6
1.72400	2	3	2	6
1.70100	2	-2	3	6
1.69800	2	3	1	7
1.69000	2	5	1	1
1.68100	6	4	3	1
1.65900	6	-3	4	0

ตารางที่ 6 ตารางแสดงค่า 2 Theta, intensity และ hkl ของ CA_2 ซึ่งเป็นข้อมูลมาตรฐานจาก 2003 JCPDS-International Center for Diffraction Data หมายเลข JCPDS 01-072-0767

Pattern : 01-072-0767 **Radiation =** 1.540600 **Quality :** Calculated

$CaAl_4O_7$

Calcium Aluminum Oxide

Lattice : Monoclinic		**Mol. weight =** 260.00
S.G. : C2/c (15)		**Volume [CD] =** 595.34
a = 12.87000		**Dx =** 2.901
b = 8.88000	**beta =** 106.75	
c = 5.44000		
a/b = 1.44932	**Z =** 4	**I/Icor =** 1.15
c/b = 0.61261		

ICSD collection code: 016191
Temperature factor: ITF
Data collection flag: Ambient.

Ponomarev, V.I., Kheiker, D.M., Belov, N.V., Kristallografiya, volume 15, page 1140 (1970)
Calculated from ICSD using POWD-12++ (1997)

Radiation : CuKa1
Lambda : 1.54060
SS/FOM : F30=488(0.0018,34)
Filter : Not specified
d-sp : Calculated spacings

2th	i	h	k	l
12.275	3	1	1	0
14.363	73	2	0	0
19.255	23	-1	1	1
19.982	450	0	2	0
22.669	13	1	1	1
23.847	5	3	1	0
24.695	189	2	2	0
25.463	999	-3	1	1
26.354	12	0	2	1
27.610	82	-2	2	1
28.957	221	4	0	0
31.047	181	1	3	0
32.488	255	2	2	1
32.973	249	3	1	1
34.405	297	0	0	2
34.547	445	-1	3	1
*34.547	445	-1	1	2
35.434	113	4	2	0
35.544	70	-4	2	1
36.522	33	-3	1	2
36.645	36	1	3	1
36.951	149	-5	1	1
37.417	28	3	3	0
37.851	2	5	1	0
38.252	7	-4	0	2
38.657	106	1	1	2
39.083	3	-2	2	2
40.105	1	0	2	2
40.606	11	0	4	0
41.306	87	2	0	2
43.285	16	4	2	1
*43.285	16	2	4	0
43.524	27	-4	2	2
43.844	72	-5	1	2
44.052	132	6	0	0
*44.052	132	3	3	1
44.318	38	0	4	1
45.128	25	-2	4	1
45.322	75	-1	3	2
46.163	54	5	1	1
46.291	38	2	2	2
46.904	27	-3	3	2
47.253	13	-5	3	1
*47.253	13	-6	2	1
47.486	5	3	1	2
47.806	75	-6	0	2
47.994	54	5	3	0
48.662	61	1	3	2
48.813	34	6	2	0
50.723	115	-4	4	1
*50.723	115	-7	1	1
51.908	85	-3	1	3
52.011	48	-1	1	3
*52.011	48	4	0	2
52.306	8	-6	2	2
52.981	6	7	1	0
53.071	4	-5	3	2
53.442	5	-2	4	2
54.348	51	-1	5	1
54.808	10	-7	1	2
55.096	14	5	3	1
55.836	4	1	5	1
56.397	41	3	5	0
56.575	45	1	1	3
*56.575	45	6	2	1
56.781	45	4	4	1
56.893	26	0	2	3
57.203	21	-3	5	1
59.167	21	-7	3	1
59.309	40	2	4	2
59.461	79	5	1	2
60.005	32	8	0	0
60.323	144	-8	0	2
*60.323	144	-1	3	3
61.234	37	7	3	0
*61.234	37	-8	2	1
61.462	23	6	4	0
*61.462	23	3	5	1
62.463	1	-1	5	2
62.728	24	0	6	0
62.876	22	-6	2	3
*62.876	22	-7	3	2
63.191	15	2	2	3
63.740	17	-3	5	2
63.913	12	8	2	0
64.026	17	-5	5	1
64.187	25	-5	3	3
*64.187	25	-8	2	2
64.390	12	-7	1	3
64.458	10	1	3	3
*64.458	10	-6	4	2
64.725	15	2	6	0
64.841	13	3	1	3
65.184	10	1	5	2
65.423	10	6	0	2
65.513	18	0	6	1
66.158	8	-2	6	1
*66.158	8	-9	1	1
66.529	24	-2	4	3
67.186	1	5	3	2
68.269	71	6	4	1
68.352	53	-9	1	2
*68.352	53	-4	4	3
68.693	13	7	3	1
68.898	9	-5	5	2
69.252	19	-2	0	4
69.387	16	9	1	0
69.774	5	-4	0	4
69.955	9	-3	1	4

2th	i	h	k	l
70.537	38	4	6	0
*70.537	38	-4	6	1
71.335	2	-1	1	4
71.665	11	3	5	2
71.895	33	-7	3	3
*71.895	33	8	2	1
72.257	20	3	3	3
72.526	15	-8	4	1
*72.526	15	0	0	4
72.863	9	-2	6	2
*72.863	9	-2	2	4
73.409	27	-4	2	4
73.860	10	7	1	2
73.972	11	-6	4	3
74.056	11	-6	0	4
74.232	14	-7	5	1
74.981	7	8	4	0
75.183	23	-3	5	3
*75.183	23	-8	4	2
75.610	14	-9	3	2
75.907	24	-4	6	2
76.109	14	0	2	4
76.421	9	1	1	4
76.605	8	9	3	0
77.217	8	-1	7	1
*77.217	8	-10	2	1
77.371	7	10	0	0
77.614	6	-7	5	2
*77.614	6	-6	2	4
77.736	2	9	1	1
77.912	3	2	6	2
78.442	15	1	7	1
*78.442	15	-1	3	4
78.631	12	-6	6	1
*78.631	12	-10	2	2
78.916	4	3	7	0
79.025	9	1	5	3
79.479	1	2	0	4
*79.479	1	-5	3	4
79.914	3	6	4	2
80.933	8	10	2	0
*80.933	8	7	3	2
81.111	5	8	0	2
81.550	1	5	5	2
81.885	10	-8	0	4
82.521	4	8	4	1
*82.521	4	-6	6	2
82.776	7	-9	3	3
82.901	8	2	2	4
*82.901	8	7	5	1
83.035	8	-8	4	3
83.350	5	3	7	1
*83.350	5	5	3	3
83.527	17	-11	1	1
*83.527	17	4	4	3
83.976	4	-4	4	4
84.195	3	-1	7	2
84.417	1	-2	6	3
84.588	1	8	2	2
84.720	1	9	3	1
85.153	9	-10	2	3
85.394	14	-8	2	4
*85.394	14	-7	3	4
85.597	10	-5	7	1
85.812	8	6	2	3
*85.812	8	4	6	2
85.926	8	-7	5	3
86.145	6	-4	6	3
*86.145	6	5	7	0
86.295	7	0	6	3
*86.295	7	3	5	3
86.646	4	0	4	4
*86.646	4	1	7	2
87.534	1	-9	5	1
87.889	9	0	8	0
*87.889	9	-9	1	4
89.082	1	-10	4	2
89.557	10	10	2	1
*89.557	10	-9	5	2
89.726	4	4	0	4
*89.726	4	2	8	0

ตารางที่ 7 ตารางแสดงค่า 2 Theta, intensity และ hkl ของ $C_{12}A_7$ ซึ่งเป็นข้อมูลมาตรฐานจาก 2003 JCPDS-International Center for Diffraction Data หมายเลข JCPDS 01-070-2144

Pattern : 01-070-2144 **Radiation =** 1.540600 **Quality :** Alternate

$(CaO)_{12}(Al_2O_3)_7$

Calcium Aluminum Oxide
Mayenite, syn

Lattice : Body-centered cubic
S.G. : I-43d (220)
Mol. weight = 1386.68
Volume [CD] = 1723.25
a = 11.98900
Z = 2
Dx = 2.672
I/Icor = 2.13

ICSD collection code: 006287
Temperature factor: ATF
Remarks from ICSD/CSD: REM REF.
Sample preparation: Prepared from a melt.
Additional pattern: See PDF 9-413.
General comments: Related to garnet structure.
Test from ICSD: Calc. density unusual but tolerable.
Data collection flag: Ambient.

Bartl, H., Scheller, T., Neues Jahrb. Mineral., Monatsh., volume 1970, page 547 (1970)
Calculated from ICSD using POWD-12++ (1997)

Radiation : CuKa1
Lambda : 1.54060
SS/FOM : F30=1000(0.0001,31)
Filter : Not specified
d-sp : Calculated spacings

2th	i	h	k	l
18.110	999	2	1	1
20.941	33	2	2	0
23.446	86	3	1	0
27.821	125	3	2	1
29.785	252	4	0	0
33.397	691	4	2	0
35.079	58	3	3	2
36.693	340	4	2	2
38.248	32	5	1	0
41.209	241	5	2	1
42.625	7	4	4	0
44.004	17	5	3	0
46.665	199	5	3	2
47.952	5	6	2	0
49.214	34	5	4	1
51.668	28	6	3	1
52.865	69	4	4	4
54.042	36	7	1	0
55.203	183	6	4	0
56.347	62	5	5	2
57.476	209	6	4	2
58.592	3	7	3	0
60.784	29	7	3	2
61.862	34	8	0	0
62.930	40	7	4	1
65.035	1	6	5	3
66.074	5	8	2	2
67.106	97	7	5	0
69.144	13	7	5	2
70.154	32	8	4	0
71.157	8	9	1	0
72.153	69	8	4	2
73.144	23	9	2	1
74.131	26	6	6	4
75.112	36	8	5	1
77.061	16	9	3	2
78.030	2	8	4	4
78.996	25	9	4	1
79.958	1	8	6	0
80.917	4	10	1	1
81.874	16	10	2	0
82.829	2	9	4	3
84.732	18	10	3	1
86.630	6	8	7	1
87.577	56	8	6	4
88.524	8	10	3	3
89.470	26	10	4	2

ตารางที่ 8 ตารางแสดงค่า 2 Theta, intensity และ hkl ของ C_3S ซึ่งเป็นข้อมูลมาตรฐานจาก 2003 JCPDS-International Center for Diffraction Data หมายเลข JCPDS 01-086-0402

Pattern : 01-086-0402 ***Radiation =*** 1.540600 ***Quality :*** Calculated

Ca_3SiO_5

Calcium Silicon Oxide
Hatrurite, syn

Lattice : Monoclinic
S.G. : Cm (8)
Mol. weight = 228.32
Volume [CD] = 721.28
Dx = 3.154

a = 12.23500
b = 7.07300 ***beta =*** 116.31
c = 9.29800
a/b = 1.72982 ***Z =*** 6 ***I/Icor =*** 0.93
c/b = 1.31458

ICSD collection code: 081100
Temperature factor: ITF
Additional pattern: See PDF 49-442.
Data collection flag: Ambient.

Mumme, W.G., Neues Jahrb. Mineral., Monatsh., volume 1995, page 145 (1995)
Calculated from ICSD using POWD-12++ (1997)

Radiation : CuKa1 ***Filter :*** Not specified
Lambda : 1.54060 ***d-sp :*** Calculated spacings
SS/FOM : F30= 72(0.0085,49)

2th	i	h	k	l
10.606	7	0	0	1
14.892	97	-2	0	1
*14.892	97	1	1	0
16.088	37	-1	1	1
*16.088	37	2	0	0
20.311	3	-2	0	2
*20.311	3	1	1	1
21.303	18	0	0	2
22.913	77	-1	1	2
25.186	64	0	2	0
*25.186	64	-3	1	1
27.352	38	-3	1	2
*27.352	38	0	2	1
27.441	39	3	1	0
28.947	22	1	1	2
29.357	875	-2	2	1
29.414	851	-4	0	1
30.043	219	-4	0	2
*30.043	219	2	2	0
32.193	999	0	0	3
*32.193	999	2	0	2
32.504	873	-2	2	2
32.632	699	4	0	0
33.142	44	-3	1	3
*33.142	44	0	2	2
33.292	44	3	1	1
34.259	374	-4	0	3
34.355	769	2	2	1
38.652	148	-2	2	3
38.828	103	-2	0	4
*38.828	103	4	0	1
38.909	70	1	1	3
39.557	19	-1	3	1
*39.557	19	-4	2	2
39.638	18	-5	1	1
41.153	143	-4	0	4
41.298	311	0	2	3
*41.298	311	2	2	2
41.400	209	3	1	2
41.538	146	-5	1	3
*41.538	146	1	3	1
41.646	145	4	2	0
42.344	11	-1	1	4
42.460	8	2	0	3
42.978	23	-4	2	3
*42.978	23	-1	3	2
43.144	19	5	1	0
43.392	13	0	0	4
44.344	7	-3	3	1
*44.344	7	-6	0	2
45.699	75	-3	3	2
*45.699	75	3	3	0
45.829	75	-6	0	1
46.812	144	-2	2	4
*46.812	144	4	2	1
47.019	84	4	0	2
48.847	1	-4	2	4
*48.847	1	-1	3	3
49.079	1	5	1	1
49.643	59	-3	3	3
*49.643	59	1	1	4
49.847	52	-4	0	5
*49.847	52	6	0	0
49.995	49	2	2	3
50.725	5	-3	1	5
50.818	6	0	2	4
50.937	7	3	1	3
51.705	591	0	4	0
*51.705	591	-6	2	2
52.890	3	0	4	1
*52.890	3	-6	2	3
52.993	2	-6	2	1
53.353	5	-1	1	5
53.477	5	2	0	4
53.824	2	-5	1	5
53.958	2	1	3	3
54.065	3	4	2	2
*54.065	3	-5	3	2
54.494	2	-7	1	3
*54.494	2	-5	3	1
55.045	6	0	0	5
55.736	28	-6	0	5
*55.736	28	-3	3	4
55.921	57	3	3	2
56.031	34	-5	3	3
*56.031	34	-2	4	2
56.198	21	-7	1	1
56.382	227	-2	2	5
*56.382	227	-6	2	4
56.487	143	0	4	2
56.612	138	4	0	3
*56.612	138	6	2	0
57.197	3	-7	1	4
57.326	2	5	3	0
59.778	57	-4	0	6
59.983	119	2	2	4
60.557	39	-4	4	1
*60.557	39	-8	0	3
60.900	12	-4	4	2
61.027	10	-8	0	2
*61.027	10	-2	0	6
61.197	8	1	1	5
61.337	6	-3	1	6
61.442	5	0	2	5
61.571	6	3	1	4
62.088	150	-7	1	5
*62.088	150	-6	2	5
62.179	164	0	4	3
*62.179	164	2	4	2
62.274	120	5	3	1
62.366	236	6	2	1
*62.366	236	-8	0	4
62.788	18	1	3	4
62.908	13	4	2	3
63.451	85	-4	4	3
63.668	82	-8	0	1
*63.668	82	-3	3	5
63.871	33	3	3	3
63.998	9	6	0	2
65.135	7	-1	1	6
65.267	5	2	0	5
65.891	4	-4	2	6
65.976	4	-1	3	5
66.217	5	5	1	3
66.306	7	-8	0	5
66.454	14	-2	4	4
*66.454	14	4	4	1
66.680	12	-8	2	3
*66.680	12	-7	3	2
66.983	3	-1	5	1
*66.983	3	-7	3	3
67.122	9	-8	2	2
*67.122	9	-2	2	6
67.355	52	0	0	6
*67.355	52	4	0	4
68.074	23	-4	4	4
68.371	17	8	0	0
*68.371	17	1	5	1
68.497	9	-7	3	1
69.010	1	2	4	3
69.404	7	-7	3	4
*69.404	7	-1	5	2
69.593	8	-6	2	6
*69.593	8	-8	2	1
70.391	3	-3	5	1
*70.391	3	-6	4	2
70.894	5	-4	0	7
71.125	10	2	2	5
71.503	11	-9	1	4
*71.503	11	-6	4	1
72.182	7	-8	0	6
*72.182	7	1	5	2
72.410	17	7	3	0
*72.410	17	4	4	2
73.149	8	-3	3	6
*73.149	8	4	2	4
73.364	5	3	3	4
73.505	4	-2	0	7
*73.505	4	6	0	3
73.812	2	-7	3	5
*73.812	2	-1	5	3
74.115	2	8	2	0
74.458	5	-3	5	3
*74.458	5	-9	1	5
74.592	11	-4	4	5
*74.592	11	6	4	0
74.963	4	8	0	1
76.559	1	-4	2	7
76.661	2	-1	3	6
76.929	2	5	1	4
77.309	1	-7	1	7
77.549	1	2	4	4
77.672	1	5	3	3
77.812	3	-8	2	6
77.946	4	-1	1	7
*77.946	4	1	5	3
78.049	3	2	0	6
*78.049	3	-5	5	2
78.144	4	7	3	1
*78.144	4	-10	0	3
78.418	2	-5	5	1
*78.418	2	-10	0	4
78.684	1	-6	2	7
79.064	12	-2	2	7
*79.064	12	6	2	3
79.344	11	4	0	5
79.677	9	-5	5	3
*79.677	9	6	4	1
79.864	21	-8	0	7
*79.864	21	-10	0	2
80.168	40	4	4	3
*80.168	40	-1	5	4
80.691	3	0	0	7
*80.691	3	-10	0	5
80.775	3	5	5	0
81.700	5	-9	3	3
82.887	34	-4	4	6
83.331	19	8	0	2
*83.331	19	-4	0	8

ตารางที่ 9 ตารางแสดงค่า 2 Theta, intensity และ hkl ของ C_2S ซึ่งเป็นข้อมูลมาตรฐานจาก 2003 JCPDS-International Center for Diffraction Data หมายเลข JCPDS 00-049-1673

Pattern : 00-049-1673 **Radiation =** 1.540600 **Quality :** Not indexed

β-Ca_2SiO_4

Calcium Silicate

Lattice : Monoclinic

S.G. : P21/n (14)

Mol. weight = 172.24

Volume [CD] = 345.81

Dx = 3.308

a = 5.51210

b = 6.75750

c = 9.31380

a/b = 0.81570

c/b = 1.37829

beta = 94.58

Z = 4

Sample preparation: Calcium silicate was mixed with 0.5% by weight of Cr2 O3 to stabilize it. The mixture was heated to 1400 C, then cooled.
General comments: Rietveld method.
General comments: Structure is heavily twinned.
General comments: Material is stabilized with 0.5 wt.% Cr2 O3.
Additional pattern: See ICSD 81096 (PDF 86-398).
Data collection flag: Ambient.

Mumme, W., Hill, R., Bushnell-Wye, G., Segnit, E., Neues Jahrb. Mineral., Abh., volume 169, page 35 (1995)

CAS Number: 10034-77-2

Radiation : Sync

Lambda : 0.85040

SS/FOM : F30= 90(0.0088,38)

Filter : Monochromator crystal

d-sp : Calculated spacings

External standard : Si

2th	i	h	k	l
18.074	4	1	0	-1
18.894	10	0	0	2
23.224	8	0	1	2
23.472	6	1	1	1
26.355	10	0	2	0
27.490	11	1	1	-2
28.082	8	0	2	1
29.277	13	1	1	2
31.049	32	1	2	0
31.774	16	0	1	3
32.007	100	1	0	-3
32.149	89	1	2	-1
32.570	98	2	0	0
32.754	32	0	2	2
32.940	36	1	2	1
34.345	61	1	0	3
35.236	16	2	1	0
36.619	18	2	0	-2
36.900	8	1	1	3
37.281	16	2	1	1
37.409	18	1	2	2
38.766	3	0	0	4
39.046	4	2	1	-2
39.456	32	0	2	3
41.030	64	0	3	1
41.089	19	0	1	4
41.685	19	2	1	2
41.928	3	1	2	-3
42.361	11	2	2	0
42.909	2	2	2	-1
43.167	9	-1	1	4
43.385	7	1	3	0
44.142	20	2	2	1
44.347	12	2	1	-3
44.670	14	0	3	2
44.810	19	1	3	1
45.595	2	1	1	4
45.692	2	2	2	-2
47.490	10	0	2	4
47.889	8	2	1	3
48.023	16	2	2	2
48.376	1	1	3	2
49.298	7	2	0	-4
50.049	5	0	3	3
50.405	14	2	2	-3
50.554	10	1	0	-5
50.947	13	0	1	5
51.658	5	3	1	0
51.847	2	3	1	-1
52.455	2	1	1	-5
52.946	9	2	3	-1
53.278	4	1	0	5
53.649	17	2	2	3
53.991	7	2	3	1
54.267	8	0	4	0
55.223	3	0	4	1
56.216	24	3	0	-3
56.517	11	0	2	5
56.745	5	2	2	-4
56.975	9	1	4	0
57.168	15	3	2	0
57.324	17	3	2	-1
57.677	3	1	4	-1
58.035	10	0	4	2
58.155	6	1	4	1
58.560	17	1	3	-4

ตารางที่ 10 ตารางแสดงค่า 2 Theta, intensity และ hkl ของ ยิปซัม ซึ่งเป็นข้อมูลมาตรฐานจาก 2003 JCPDS-International Center for Diffraction Data หมายเลข JCPDS 01-074-1433

Pattern : 01-074-1433   ***Radiation =*** 1.540600   ***Quality :*** Calculated

$Ca(SO_4)(H_2O)_2$

Calcium Sulfate Hydrate
Gypsum

Lattice : Base-centered monoclinic
S.G. : I2/c (0)

Mol. weight = 172.17
Volume [CD] = 495.15
Dx = 2.310
I/Icor = 1.68

a = 5.67900
b = 15.20200   ***beta =*** 118.43
c = 6.52200
a/b = 0.37357   ***Z =*** 4
c/b = 0.42902

ICSD collection code: 027221
ICSD space group comment: ICSD SG: I12/C1 IT is: 15 SG short form: I2/c
Temperature factor: ATF
Remarks from ICSD/CSD: REM TEM 294.
Remarks from ICSD/CSD: REM M PDF 6-46, 33-311 (setting C2/c).
Remarks from ICSD/CSD: REM B Space group given by author: I12/a1.
Sample source or locality: Specimen from Hampshire, England, UK.
Additional pattern: See PDF 70-982, PDF 70-983, PDF 70-984, PDF 72-596, PDF 74-1904 and PDF 74-1905.
Data collection flag: Ambient.

Pedersen, B.F., Semmingsen, D., Acta Crystallogr., Sec. B, volume 38, page 1074 (1982)
Calculated from ICSD using POWD-12++ (1997)

Radiation : CuKa1   ***Filter :*** Not specified
Lambda : 1.54060   ***d-sp :*** Calculated spacings
SS/FOM : F30=418(0.0019,37)

2th	i	h	k	l
11.633	918	0	2	0
16.506	1	0	1	1
18.687	18	1	1	0
20.731	999	-1	2	1
23.388	122	0	4	0
*23.388	122	0	3	1
25.014	1	1	3	0
28.130	37	-1	1	2
29.117	636	-1	4	1
31.090	426	1	2	1
31.163	292	0	0	2
32.074	82	-2	1	1
32.776	11	-1	3	2
33.368	311	0	5	1
*33.368	311	0	2	2
34.509	34	1	5	0
34.597	38	-2	0	2
35.399	7	0	6	0
35.936	95	2	0	0
36.266	13	-2	3	1
36.618	59	-2	2	2
37.370	35	1	4	1
37.895	2	2	2	0
39.328	4	0	4	2
40.656	105	-1	5	2
42.183	14	-2	4	2
43.322	123	2	4	0
43.486	85	-1	2	3
43.604	113	-2	5	1
*43.604	113	1	1	2
44.229	39	-2	1	3
44.577	6	0	7	1
45.509	22	1	7	0
46.209	4	1	6	1
46.404	21	2	1	1
46.921	1	1	3	2
47.509	7	-2	3	3
47.868	108	0	6	2
*47.868	108	0	1	3
48.400	95	-1	4	3
48.774	23	-3	1	2
49.572	3	2	3	1
50.334	89	-2	6	2
50.691	45	-3	2	1
51.016	12	0	3	3
51.160	23	-1	8	1
51.331	78	2	6	0
51.833	3	-3	3	2
53.070	1	-2	7	1
*53.070	1	1	5	2
53.608	8	-2	5	3
54.437	16	-3	2	3
55.118	44	-3	4	1
55.484	2	3	1	0
*55.484	2	2	5	1
55.860	23	-1	6	3
56.766	69	-2	0	4
*56.766	69	0	9	1
57.556	3	1	9	0
*57.556	3	-3	5	2
58.193	20	-2	2	4
*58.193	20	0	8	2
58.294	15	3	3	0
58.670	7	-3	4	3
59.497	5	2	0	2
60.362	14	-2	8	2
60.735	3	1	2	3
60.870	13	-1	3	4
*60.870	13	0	10	0
61.247	8	2	8	0
61.471	6	1	7	2
61.896	2	-1	9	2
62.019	5	-2	7	3
*62.019	5	-3	6	1
62.232	3	-2	4	4
62.431	6	-3	1	4
63.750	7	2	7	1
*63.750	7	-1	10	1
64.116	1	-2	9	1
64.708	25	1	4	3
64.932	17	0	7	3
64.989	17	0	0	4
65.327	10	-1	8	3
*65.327	10	-3	6	3
65.796	18	-4	0	2
66.281	2	0	2	4
66.621	14	3	2	1
67.079	4	-4	2	2
67.525	5	-4	1	3
68.692	34	1	10	1
*68.692	34	-2	6	4
69.189	2	-4	1	1
70.085	8	-4	3	3
*70.085	8	0	4	4
70.416	11	3	4	1
70.666	9	1	11	0
70.863	6	-4	4	2
71.010	12	-3	8	1
*71.010	12	1	6	3
71.173	20	2	6	2
71.328	9	3	7	0
71.743	2	-4	3	1
*71.743	2	1	9	2
71.961	1	-2	10	2
72.197	1	-2	9	3
72.714	1	-2	1	5
*72.714	1	2	10	0
72.982	2	-4	0	4
73.657	1	-1	7	4

2th	i	h	k	l
73.814	1	2	9	1
74.128	13	-3	8	3
74.594	2	-1	11	2
74.898	4	0	12	0
*74.898	4	0	9	3
75.163	2	-2	3	5
75.627	1	-3	9	2
76.050	9	-3	2	5
76.236	17	4	0	0
*76.236	17	0	6	4
76.551	13	-1	10	3
*76.551	13	3	6	1
76.866	19	-1	2	5
76.990	9	-4	6	2
77.399	13	-2	8	4
*77.399	13	4	2	0
77.506	7	-1	12	1
*77.506	7	-3	7	4
77.847	2	-4	4	4
78.341	1	2	3	3
79.693	22	-3	4	5
*79.693	22	2	8	2
80.143	2	1	3	4
80.467	6	-1	4	5
80.994	1	4	4	0
*80.994	1	3	9	0
81.688	4	3	3	2
81.921	6	-3	10	1
82.100	2	1	12	1
*82.100	2	-4	7	3
83.070	1	-4	1	5
*83.070	1	2	5	3
83.325	8	-1	9	4
*83.325	8	0	12	2
83.811	12	1	11	2
*83.811	12	-4	6	4
84.598	5	0	8	4
*84.598	5	0	1	5
84.915	25	3	8	1
*84.915	25	-3	10	3
85.197	19	1	13	0
*85.197	19	-2	12	2
85.334	7	-4	8	2
85.435	5	-4	3	5
85.598	4	-3	6	5
85.793	1	2	11	1
85.973	4	2	12	0
86.423	1	-1	6	5
*86.423	1	3	5	2
86.733	4	-5	2	3
86.914	6	0	11	3
*86.914	6	4	6	0
87.546	1	-3	11	2
87.725	1	4	1	1
88.020	1	-2	10	4
88.901	1	-1	13	2
89.173	1	-5	3	2

ตารางที่ 11 ตารางแสดงค่า 2 Theta, intensity และ hkl ของ โวลลาสโทไนต์ ซึ่งเป็นข้อมูลมาตรฐาน จาก 2003 JCPDS-International Center for Diffraction Data หมายเลข JCPDS 01-084-0655

Pattern : 01-084-0655 **Radiation =** 1.540600 **Quality :** Calculated

$CaSiO_3$

Calcium Silicate
Wollastonite-2M

Lattice : Monoclinic
S.G. : P21/a (14)

Mol. weight = 116.16
Volume [CD] = 795.07

a = 15.42400
b = 7.32400 **beta =** 95.37
c = 7.06920
a/b = 2.10595 **Z =** 12
c/b = 0.96521

Dx = 2.911
Dm = 2.910
I/Icor = 1.81

ICSD collection code: 201538
Temperature factor: ITF
Sample source or locality: Specimen from Esashi mine, Iwate, Japan.
Additional pattern: See PDF 76-925 and PDF 43-1460.
Remarks from ICSD/CSD: Pyroxenoid group.
Remarks from ICSD/CSD: TWI
Data collection flag: Ambient.

Ohashi, Y., Phys. Chem. Miner., volume 10, page 217 (1984)
Calculated from ICSD using POWD-12++ (1997)

Radiation : CuKa1
Lambda : 1.54060
SS/FOM : F30=151(0.0045,44)

Filter : Not specified
d-sp : Calculated spacings

2th	i	h	k	l
11.516	90	2	0	0
12.567	5	0	0	1
13.383	1	1	1	0
16.255	15	2	0	-1
16.715	3	2	1	0
17.461	9	0	1	1
17.861	5	2	0	1
18.021	6	1	1	-1
18.768	18	1	1	1
20.298	54	2	1	-1
21.159	25	3	1	0
21.615	10	2	1	1
23.150	165	4	0	0
23.823	73	3	1	-1
24.286	2	0	2	0
25.288	214	0	0	2
*25.288	214	4	0	-1
26.187	46	4	1	0
26.841	284	2	0	-2
27.464	18	0	2	1
*27.464	18	4	0	1
27.801	21	1	2	-1
28.221	93	4	1	-1
*28.221	93	1	1	-2
28.858	204	2	0	2
29.525	71	2	1	-2
29.978	999	3	2	0
31.384	6	2	1	2
31.563	27	5	1	0
31.959	55	3	2	-1
32.849	50	4	0	-2
33.270	2	3	2	1
33.800	1	4	2	0
34.470	3	3	1	2
35.032	57	6	0	0
35.132	45	4	1	-2
*35.132	45	5	1	1
35.437	33	4	2	-1
*35.437	33	1	2	-2
36.241	158	4	0	2
*36.241	158	1	2	2
36.984	1	4	2	1
37.183	4	6	1	0
37.264	3	1	3	0
38.215	87	5	2	0
*38.215	87	4	1	2
38.336	78	0	0	3
38.490	64	3	2	-2
*38.490	64	6	0	1
39.050	117	5	1	-2
*39.050	117	2	0	-3
39.465	13	5	2	-1
40.235	5	1	1	-3
40.336	8	0	1	3
40.499	12	2	3	-1
*40.499	12	6	1	1
40.707	34	3	2	2
41.283	167	5	2	1
*41.283	167	1	1	3
41.611	29	6	0	-2
42.455	1	3	3	-1
42.653	5	5	1	2
*42.653	5	3	1	-3
43.236	8	4	0	-3
43.492	1	6	1	-2
*43.492	1	3	3	1
43.803	1	7	1	-1
43.915	1	4	3	0
44.051	1	6	2	-1
*44.051	1	4	2	2
44.731	51	5	2	-2
45.056	7	4	1	-3
45.200	9	4	3	-1
*45.200	9	1	3	-2
45.706	38	3	1	3
*45.706	38	6	0	2
45.811	22	1	2	-3
46.048	3	6	2	1
46.137	6	2	3	-2
*46.137	6	7	1	1
46.513	2	4	3	1
*46.513	2	2	2	-3
46.788	13	1	2	3
47.318	25	8	0	0
47.413	18	2	3	2
*47.413	18	6	1	2
47.770	7	3	3	-2
47.986	16	5	2	2
*47.986	16	3	2	-3
48.142	11	5	1	-3
48.324	45	7	2	0
*48.324	45	7	1	-2
48.438	26	2	2	3
48.593	14	5	3	-1
48.763	8	6	2	-2
48.922	12	4	1	3
49.054	43	8	1	0
*49.054	43	7	2	-1
49.757	171	0	4	0
50.134	22	4	3	-2
*50.134	22	5	3	1
50.393	17	8	0	1
50.795	43	3	2	3
51.202	14	7	2	1
*51.202	14	2	4	0
51.533	6	0	4	1
51.704	8	6	3	0
*51.704	8	1	4	-1
51.925	72	0	0	4

2th	i	h	k	l
52.019	42	8	1	1
*52.019	42	8	0	-2
52.193	23	2	0	-4
52.548	13	6	3	-1
*52.548	13	4	3	2
52.727	11	2	4	-1
*52.727	11	5	1	3
53.064	109	5	2	-3
*53.064	109	3	4	0
53.283	100	7	2	-2
*53.283	100	2	4	1
53.640	9	8	1	-2
53.780	4	2	1	-4
*53.780	4	4	2	3
54.178	4	0	3	3
54.308	4	6	3	1
*54.308	4	3	4	-1
54.457	11	8	2	-1
*54.457	11	1	1	4
54.965	6	1	3	3
*54.965	6	3	1	-4
55.315	5	4	0	-4
55.562	5	4	4	0
*55.562	5	9	1	-1
56.083	11	3	3	-3
*56.083	11	2	1	4
56.337	9	7	3	0
56.440	7	2	3	3
*56.440	7	6	2	-3
56.619	26	0	4	2
*56.619	26	4	4	-1
56.732	16	6	3	-2
56.994	6	7	3	-1
*56.994	6	6	1	3
57.295	66	1	4	2
*57.295	66	7	2	2
57.433	85	2	4	-2
58.033	2	4	3	-3
58.191	2	8	1	2
*58.191	2	8	2	-2
58.358	5	3	1	4
*58.358	5	2	2	-4
58.544	18	2	4	2
*58.544	18	3	3	3
58.653	9	5	4	0
59.006	12	1	2	4
59.227	8	8	0	-3
59.498	21	3	2	-4
59.743	11	9	2	0
*59.743	11	4	0	4
60.104	20	6	3	2
*60.104	20	9	2	-1
60.214	25	10	0	0
60.497	21	7	2	-3
*60.497	21	2	2	4
60.640	12	5	3	-3
*60.640	12	8	1	-3
60.914	20	4	4	-2
*60.914	20	5	4	1
60.997	14	6	0	-4
61.392	4	8	3	0
61.803	1	7	1	3
61.881	1	8	3	-1
*61.881	1	10	1	-1
62.299	18	6	4	0
62.521	13	6	1	-4
*62.521	13	9	2	1
62.727	63	3	2	4
63.049	27	4	4	2
*63.049	27	10	0	1
63.573	22	9	2	-2
*63.573	22	5	4	-2
63.766	46	10	0	-2
*63.766	46	6	3	-3
63.997	21	8	3	1
64.506	8	0	4	3
*64.506	8	7	3	2
64.736	5	5	1	4
*64.736	5	2	5	0
65.000	23	0	5	1
*65.000	23	2	4	-3
65.117	14	1	3	-4
*65.117	14	10	1	-2
65.318	7	0	3	4
65.426	3	8	3	-2
*65.426	3	1	5	1
65.550	6	2	3	-4
*65.550	6	8	0	3
65.787	3	9	1	-3

ตารางที่ 12 ตารางแสดงค่า 2 Theta, intensity และ hkl ของ คริสโตบาไลต์ ซึ่งเป็นข้อมูลมาตรฐานจาก 2003 JCPDS-International Center for Diffraction Data หมายเลข JCPDS 01-076-0941

Pattern : 01-076-0941 ***Radiation =*** 1.540600 ***Quality :*** Calculated

SiO_2

Silicon Oxide
Cristobalite low

Lattice : Tetragonal

S.G. : P41212 (92)

a = 4.99840

c = 7.02420

Z = 4

Mol. weight = 60.08

Volume [CD] = 175.49

Dx = 2.274

I/Icor = 5.13

ICSD collection code: 034933
Temperature factor: ATF
Remarks from ICSD/CSD: REM TEM 503.
Sample source or locality: Specimen from Ellora Caves, India.
Additional pattern: See PDF 76-0938.
Data collection flag: Non ambient temperature.

Peacor, D.R., Z. Kristallogr., Kristallgeom., Kristallphys., Kristallchem., volume 138, page 274 (1973)
Calculated from ICSD using POWD-12++ (1997)

Radiation : CuKa1

Lambda : 1.54060

SS/FOM : F30=1000(0.0000,33)

Filter : Not specified

d-sp : Calculated spacings

2th	i	h	k	l
21.806	999	1	0	1
25.177	4	1	1	0
28.243	65	1	1	1
31.097	79	1	0	2
35.904	106	2	0	0
36.022	100	1	1	2
38.191	2	2	0	1
40.315	1	2	1	0
42.400	21	2	1	1
44.456	23	2	0	2
46.486	36	1	1	3
48.218	36	2	1	2
51.684	3	2	2	0
52.036	5	0	0	4
53.592	18	2	0	3
55.412	4	1	0	4
56.739	29	3	0	1
56.905	31	2	1	3
58.331	2	3	1	0
58.413	2	2	2	2
59.937	16	3	1	1
61.556	16	3	0	2
64.609	24	3	1	2
64.839	19	2	0	4
66.201	10	2	2	3
67.511	1	3	2	0
67.811	16	2	1	4
68.995	8	3	2	1
69.143	8	3	0	3
69.440	12	1	0	5
72.029	11	3	1	3
73.363	12	3	2	2
76.113	1	4	0	0
76.398	7	2	2	4
77.529	8	4	0	1
77.954	1	2	0	5
78.901	11	4	1	0
79.183	6	3	0	4
80.443	11	3	2	3
80.723	14	2	1	5
81.662	2	3	3	0
*81.662	2	4	0	2
81.943	5	3	1	4
83.053	3	3	3	1
84.474	2	4	1	2
87.203	4	4	2	0
*87.203	4	3	3	2
87.758	10	1	1	6
88.512	7	4	2	1
88.651	2	4	0	3
88.928	2	2	2	5

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวเก็จแก้ว ก้านลาย เกิดวันที่ 8 พฤศจิกายน พ.ศ. 2534 ที่จังหวัดนนทบุรี สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี หลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ในปีการศึกษา 2556 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญามหาบัณฑิต วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต หลักสูตรเทคโนโลยีเซรามิก ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2558 และสำเร็จการศึกษาในปีการศึกษา 2560

การนำเสนอผลงานทางวิชาการแบบ Oral presentation เรื่อง "Preparation of Porous Fused Silica Ceramics by Starch Consolidation Using Glutinous Rice Flour as a Binder" ในการประชุมทางวิชาการ International Conference on Traditional and Advanced Ceramics 2017 (ICTA2017) ระหว่างวันที่ 31 สิงหาคม ถึง 1 กันยายน พ.ศ. 2560 ณ ศูนย์นิทรรศการและประชุมไบเทค บางนา กรุงเทพฯ จัดโดย ASEAN Ceramics

การนำเสนอผลงานทางวิชาการแบบ Oral presentation เรื่อง "Fabrication of porous slumping mold using fused silica crucible waste" ในการประชุมทางวิชาการ The 24th PPC Symposium on Petroleum, Petrochemicals, and Polymers and the 9th Research Symposium on Petrochemical and Materials Technology วันที่ 5 มิถุนายน พ.ศ. 2561 ณ โรงแรมแมนดาริน กรุงเทพฯ จัดโดย The Petroleum and Petrochemical Collage, Chulalongkorn University และได้รับการตีพิมพ์ผลงานแบบ Proceeding

ได้รับการตีพิมพ์ใน Journal of Metals, Materials and Minerals เรื่อง "Starch Consolidation of Porous Fused Silica Ceramics" ฉบับที่ 28 ปี 2018

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University