

ความต้านทานการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างเฉียบพลันและสมบัติหลังเผาของวัสดุเชิงประกอบ  
สโปคูมิน/คอร์ติเคียวไรต์

นางสาวปราณี จันทร์ธา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีเซรามิก ภาควิชาวัสดุศาสตร์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

ปีการศึกษา 2554  
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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 Graduate School.

THERMAL SHOCK RESISTANCE AND FIRING PROPERTIES OF  
SPODUMENE/CORDIERITE COMPOSITES

Miss Pranee Junlar

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 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ความต้านทานการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างเฉียบพลันและสมบัติหลังเผาของวัสดุเชิงประกอบสโปกูมิน/คอร์เดียไรต์
โดย	นางสาวปราณี จันทร์ลา
สาขาวิชา	เทคโนโลยีเซรามิก
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนากร วาสนาเพียรพงศ์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	นางวรรณมา ต. แสงจันทร์

---

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้แนบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริธันว์ เจียมศิริเลิศ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนากร วาสนาเพียรพงศ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม  
(นางวรรณมา ต. แสงจันทร์)

..... กรรมการ  
(อาจารย์ ดร.วันทนีย์ พุกกะคุปต์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ดร.ลดา พันธุ์สุขุมธนา)

ปราณี จันทร์ลา : ความต้านทานการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างเฉียบพลันและสมบัติหลังเผาของวัสดุเชิงประกอบสปอดูมิน/คอร์เดียไรต์ (THERMAL SHOCK RESISTANCE AND FIRING PROPERTIES OF SPODUMENE/CORDIERITE COMPOSITES) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ.ดร.ชนากร วาสนาเพชรพงศ์, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: นางวรรณมา ต.แสงจันทร์, 94 หน้า

ภาชนะเซรามิกหุงต้มประเภทสัมผัสเปลวไฟได้โดยตรง เป็นภาชนะเครื่องครัวชนิดหนึ่งที่ทำจากวัสดุเซรามิกหรือแก้ว สามารถใช้เป็นภาชนะสำหรับปรุงอาหารโดยตั้งบนเตาแก๊ส เตาไฟฟ้า เตาอบ และเตาไมโครเวฟได้ โดยไม่เกิดการแตกร้าว วัสดุที่นำมาผลิตเป็นภาชนะประเภทนี้ต้องมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ มีค่าความแข็งแรงสูง และมีค่าการดูดซึมน้ำต่ำ สามารถทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างเฉียบพลันได้ดี ซึ่งวัสดุสปอดูมินและคอร์เดียไรต์มีสมบัติดังกล่าวข้างต้น เป็นวัสดุที่มีราคาไม่แพง สามารถนำมาขึ้นรูปด้วยวิธีเซรามิกดั้งเดิมได้ จึงเป็นวัสดุที่น่าสนใจนำมาศึกษาเพื่อใช้เป็นวัสดุผลิตภาชนะเซรามิกหุงต้ม ในงานวิจัยนี้สนใจนำบีตาสปอดูมิน ทัลค์ ดินดำ และอะลูมินา ทำให้เป็นวัสดุเชิงประกอบสปอดูมิน/คอร์เดียไรต์ ผสมกันในอัตราส่วนต่างๆ 0-100 เปอร์เซ็นต์ บดผสมแบบเปียกในหม้อบดอะลูมินา ขึ้นรูปด้วยวิธีการหล่อแบบ เเผาที่อุณหภูมิ 1220 1250 1280 และ 1310 องศาเซลเซียส นำชิ้นงานไปทดสอบสมบัติต่างๆ หลังเผา จากการทดลองพบว่าอัตราส่วนผสมของวัสดุเชิงประกอบที่เหมาะสม คือ สปอดูมิน 60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และคอร์เดียไรต์ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เเผาที่อุณหภูมิ 1280 องศาเซลเซียส ขึ้นไฟที่อุณหภูมิสูงสุด 1 ชั่วโมง ตรวจสอบพบ 2 เฟสหลักคือ บีตาสปอดูมิน และ คอร์เดียไรต์ พบสปิเนล เล็กน้อย ให้ค่าการหดตัวรวมหลังเผา 10.40 เปอร์เซ็นต์ ค่าการดูดซึมน้ำ 0.03 เปอร์เซ็นต์ ความแข็งแรง 52.07 เมกะพาสคัล ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ  $2.154 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$  และสามารถทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างเฉียบพลันได้ถึงอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ขยายผลการทดลองโดยขึ้นรูปชิ้นงานตัวอย่างผลิตภัณฑ์ต้นแบบหม้อต้มอาหาร เส้นผ่านศูนย์กลาง 25 เซนติเมตร ความจุ 1 ลิตร และเผาที่อุณหภูมิ 1250 และ 1280 องศาเซลเซียส เกิดการยุบตัวของชิ้นงานที่อุณหภูมิ 1280 องศาเซลเซียส แต่ที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส ไม่เกิดการยุบตัวของชิ้นงาน

ภาควิชา วัสดุศาสตร์..... ลายมือชื่อนิสิต.....  
 สาขาวิชา เทคโนโลยีเซรามิก..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....  
 ปีการศึกษา 2554..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....

## 5172614723 : MAJOR CERAMIC TECHNOLOGY

KEYWORDS : CERAMIC COOKWARE / CORDIERITE / SPODUMENE / COMPOSITE

PRANEE JUNLAR : THERMAL SHOCK RESISTANCE AND FIRING

PROPERTIES OF SPODUMENE/CORDIERITE COMPOSITES. ADVISOR :

ASST. PROF. THANAKORN WASANAPIARNPONG, Ph.D., CO-ADVISOR :

MRS. WANNA T.SAENGCHANTARA, 94 pp.

Ceramic cookware used with direct flame is made from ceramic or glass. It can be used directly on gas stoves, electric stoves, oven and microwave oven for the duration without damage. The selected materials must have the following properties: low thermal expansion coefficient, high strength, low water absorption and high thermal shock resistance. Cordierite and spodumene are attractive due to their fitted properties, reasonable cost, and easy shaping for conventional ceramics. In this work,  $\beta$ -spodumene, talc, ball clay and alumina were used as the starting raw materials by varying the ratio of spodumene and cordierite from 0-100 wt%. Raw materials were mixed by wet ball milling in an alumina pot mill and then shaped by slip casting process. All samples were then fired at 1220, 1250, 1280, and 1310 °C in an electric furnace. Properties of fired specimens were measured. The best formula was derived from 60 wt% spodumene and 40 wt% cordierite ratio fired at 1280 °C with soaking 1 hour. XRD analysis confirmed two main phases containing  $\beta$ -spodumene and cordierite found a little spinel. The properties of fired samples showed the total shrinkage of 10.40 %, water absorption of 0.03 %, modulus of rupture of 52.07 MPa, low thermal expansions coefficient at  $2.154 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  and high thermal shock resistance of 400 °C. In this work, the pot samples with a 25 cm diameter and 1 liter capacity were formed and then fired at 1250 and 1280 °C. The pot samples were collapsed when fired at 1280 °C, but able to maintain their shape when fired at 1250 °C.

Department : <u>Materials Science</u> .....	Student's Signature .....
Field of Study : <u>Ceramic Technology</u> .....	Advisor's Signature .....
Academic Year : <u>2011</u> .....	Co-advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ดี เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์ การสนับสนุนและความช่วยเหลือทั้งในด้านวิชาการ และการดำเนินการวิจัย จากท่านทั้งหลายและหน่วยงานต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนากร วาสนาเพียรพงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และนางวรรณมา ต.แสงจันทร์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่กรุณาให้ความรู้ คำแนะนำ ความช่วยเหลือและการแก้ไขปัญหาตลอดระยะเวลาในการทำวิจัย

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และคณาจารย์ทุกท่าน ที่กรุณาเสียสละเวลาอันมีค่า มาให้ความรู้ คำชี้แนะเกี่ยวกับแนวทางในงานวิจัย และแก้ไขข้อบกพร่องของรูปเล่มวิทยานิพนธ์ให้ถูกต้องและสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

โครงการความร่วมมือในการผลิตนักวิจัยและพัฒนาด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สำนักงานปลัดกระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ให้งบประมาณสนับสนุนในการทำวิจัย การนำเสนอผลงานในต่างประเทศ และทุนการศึกษา

สำนักเทคโนโลยีชุมชน กรมวิทยาศาสตร์บริการ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ให้ความอนุเคราะห์ในการการทำงานวิจัย ตั้งแต่ สถานที่ อุปกรณ์ วัสดุคิบ สารเคมี การวิเคราะห์และทดสอบสมบัติของชิ้นงาน

หน่วยปฏิบัติการวิจัยเซรามิกขั้นสูง ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านปิโตรเลียม ปิโตรเคมี และวัสดุขั้นสูง ที่ให้ทุนสนับสนุนการนำเสนอผลงาน

สุดท้ายขอขอบพระคุณครอบครัวผู้วิจัย ที่คอยให้การสนับสนุน และกำลังใจในทุกๆ ความสำเร็จมาโดยตลอด

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ปรีทัศน์วรรณกรรม.....	3
2.1 ภาชนะหุงต้ม.....	3
2.2 ภาชนะเซรามิกหุงต้ม.....	6
2.3 แร่สปอคูมิน.....	11
2.4 คอร์เดียไรต์.....	12
2.5 วัสดุเชิงประกอบ.....	13
2.6 วัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ.....	14
2.7 วัสดุที่มีความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างเฉียบพลัน.....	15
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	16
บทที่ 3 วิธีการดำเนินวิจัย.....	19
3.1 วัตถุประสงค์สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	19
3.1.1 วัตถุประสงค์และสารเคมี.....	19
3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	19
3.2 ขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบและชิ้นงาน.....	20
3.2.1 การเตรียมวัตถุดิบและผสมสารเคมีต่างๆ.....	20
3.2.2 การขึ้นรูปชิ้นงาน.....	25

3.2.3 การเผาผนึก.....	26
3.3 แผนผังการทดลอง .....	27
3.4 การวิเคราะห์สมบัติต่างๆ ของชิ้นงาน .....	29
3.4.1 การหัดตัวของชิ้นงานก่อนเผาและหลังเผา.....	29
3.4.2 ความหนาแน่นและการดูดซึมน้ำ.....	30
3.4.3 ความแข็งแรง (MOR) .....	31
3.4.4 องค์ประกอบทางเฟส.....	32
3.4.5 การวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน .....	33
3.4.6 การกระจายตัวของขนาดอนุภาค .....	34
3.4.7 โครงสร้างจุลภาค.....	35
3.4.8 การทดสอบความต้านทานการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างเฉียบพลัน .....	36
3.4.9 การนำความร้อน .....	37
3.4.10 ทดสอบการใช้งานจริงบนเตาแก๊สของชิ้นงานตัวอย่างหลังเผา .....	37
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปราย .....	38
4.1 ลักษณะเฉพาะของผงวัตุดิบ.....	38
4.1.1 แร่สปอคูมินก่อนเผาและหลังเผา .....	38
4.1.2 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของวัตุดิบ.....	39
4.1.3 ลักษณะทางจุลภาค .....	42
4.1.4 องค์ประกอบทางเฟส.....	43
4.2 การกระจายตัวขนาดอนุภาคหลังจากการบด.....	45
4.3 ผลการทดสอบสมบัติต่างๆ ของชิ้นงานหลังเผา .....	47
4.3.1 การหัดตัว.....	47
4.3.2 การดูดซึมน้ำ และ ความหนาแน่น .....	49
4.3.3 ความแข็งแรง .....	52
4.3.4 ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน .....	54
4.3.5 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟส .....	56
4.3.6 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค .....	60
4.3.7 ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างเฉียบพลัน .....	65
4.3.8 ผลค่าการนำความร้อน .....	66
4.4 ผลของการทดลองชิ้นรูปชิ้นงานตัวอย่างผลิตภัณฑ์ต้นแบบ .....	67



4.5 ผลการทดลองใช้งานจริงบนเตาแก๊ส .....	68
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ .....	70
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	70
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	71
รายการอ้างอิง .....	72
ภาคผนวก .....	78
ภาคผนวก ก สมบัติต่างๆ ของชิ้นงานหลังเผา .....	79
ภาคผนวก ข การกระจายขนาดของอนุภาคของวัสดุดิบ .....	82
ภาคผนวก ค การกระจายขนาดของอนุภาคของเนื้อดินสปอคูมิน/คอร์เดียไรต์หลังบด .....	85
ภาคผนวก ง การคำนวณค่าองค์ประกอบทางเคมีของสูตรเนื้อดิน CS0-CS10.....	90
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	94

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของเนื้อดินชนิดต่างๆ.....	6
ตารางที่ 2.2 วัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ.....	14
ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนผสม (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ของวัสดุเชิงประกอบ สไปคูมิน/คอร์เคียวไรต์.....	20
ตารางที่ 3.2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุดิบตั้งต้น .....	21
ตารางที่ 3.3 ส่วนผสมของเนื้อดินสไปคูมิน/คอร์เคียวไรต์ในอัตราส่วนต่างๆ .....	22
ตารางที่ 4.1 การกระจายขนาดอนุภาคและขนาดอนุภาคสะสมหลังบด 24 ชั่วโมง .....	45
ตารางที่ 4.2 การหัดตัวของชิ้นงานก่อนและหลังเผาที่อุณหภูมิ 1220 1250 1280 และ 1310 องศาเซลเซียส .....	47
ตารางที่ 4.3 การดูดซึมน้ำของชิ้นงานหลังเผาที่อุณหภูมิ 1220 1250 1280 และ 1310 องศาเซลเซียส .....	50
ตารางที่ 4.4 ความหนาแน่นของชิ้นงานหลังเผาที่อุณหภูมิ 1220 1250 1280 และ 1310 องศาเซลเซียส .....	51
ตารางที่ 4.5 ความแข็งแรงหลังเผาของชิ้นงานที่อุณหภูมิ 1220 1250 1280 และ 1310 องศาเซลเซียส .....	53
ตารางที่ 4.6 ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของชิ้นงานหลังเผาที่อุณหภูมิ 1250 1280 และ 1310 องศาเซลเซียส (ทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 25-1000 °C).....	55
ตารางที่ 4.7 องค์ประกอบทางเฟสของชิ้นงานหลังเผาที่อุณหภูมิ 1250 และ 1280 องศาเซลเซียส .....	57
ตารางที่ 4.8 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างเฉียบพลัน ตามวิธีมาตรฐาน ASTM -554-93 ที่อุณหภูมิ 150 – 400 องศาเซลเซียส .....	65
ตารางที่ 4.9 ค่าการนำความร้อน และ ค่าความจุความร้อนจำเพาะ ของชิ้นงานสูตร CS5 CS6 และ CS 7 เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 1280 องศาเซลเซียส .....	66

## สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 2.1 ภาพขณะเซรามิกผลิตจากเนื้อดินเอิร์ธเซินแวร์ .....	3
ภาพที่ 2.2 ภาพขณะเซรามิกผลิตจากเนื้อดินเทราคอตตา .....	4
ภาพที่ 2.3 ภาพขณะเซรามิกผลิตจากเนื้อดินสโตนแวร์ .....	4
ภาพที่ 2.4 ภาพขณะเซรามิกผลิตจากเนื้อดินปอร์ซเลน .....	5
ภาพที่ 2.5 ภาพขณะเซรามิกผลิตจากเนื้อดินบอนไซนา .....	5
ภาพที่ 2.6 ภาพขณะเซรามิกหุงต้มที่ขึ้นรูปด้วยวิธีปั้นเป็นหมุน .....	6
ภาพที่ 2.7 ภาพขณะเซรามิกหุงต้มประเภทสัมผัสความร้อนได้โดยตรง .....	7
ภาพที่ 2.8 ภาพขณะเซรามิกหุงต้มๆ ที่มีผิวเคลือบ .....	8
ภาพที่ 2.9 ภาพขณะเซรามิกหุงต้มๆ ไม่มีผิวเคลือบ .....	8
ภาพที่ 2.10 ภาพขณะเซรามิกหุงต้มที่ทำจากแก้วบอโรซิลิเกต .....	9
ภาพที่ 2.11 ภาพขณะเซรามิกหุงต้มที่ทำจากกลาสเซรามิก .....	9
ภาพที่ 2.12 ภาพขณะเซรามิกหุงต้มที่ทำจากคอร์เดียไรต์ .....	10
ภาพที่ 2.13 ภาพขณะเซรามิกหุงต้มที่ทำจากสปอดูมิน .....	10
ภาพที่ 2.14 แร่สปอดูมิน (Spodumene) .....	11
ภาพที่ 2.15 แร่คอร์เดียไรต์ (Cordierite) .....	12
ภาพที่ 2.16 เฟสไดอะแกรมของระบบ $\text{Li}_2\text{O}-\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ .....	17
ภาพที่ 2.17 เฟสไดอะแกรมของระบบ คอร์เดียไรต์-บิตาสปอดูมิน .....	18
ภาพที่ 3.1 หม้ออบขนาด 20 กิโลกรัม .....	23
ภาพที่ 3.2 ก) หม้ออบอะลูมินา และ ข) ลูกบดอะลูมินา .....	23
ภาพที่ 3.3 ก) เครื่องวัดความหนืดของน้ำดิน ข) หัวเข็มสำหรับวัดความหนืดของน้ำดิน และ ค) ถ้วยรองรับน้ำดินเพื่อใช้วัดความหนืด .....	24
ภาพที่ 3.4 การวัดความถ่วงจำเพาะของน้ำดิน .....	24
ภาพที่ 3.5 ก) แบบพิมพ์ปูนปลาสเตอร์ ข) การเทน้ำดินลงบนแบบพิมพ์ ค) แกะแบบพิมพ์ ปูนปลาสเตอร์ และ ง) ชิ้นงานเป็นแท่งทรงกระบอกตัน .....	25
ภาพที่ 3.6 เตาเผา Nabertherm .....	26
ภาพที่ 3.7 แผนผังการดำเนินงาน .....	27
ภาพที่ 3.8 การขีดเส้นลงบนชิ้นงานเพื่อวัดการหดตัว .....	29

ภาพที่ 3.9 ก) เครื่องหาค่าความแข็งแรง (MOR) และข) การทดสอบความแข็งแรงของชิ้นงาน .....	31
ภาพที่ 3.10 เครื่อง X-Ray Diffractometer .....	32
ภาพที่ 3.11 เครื่อง Dilatometer (1161, Anter Unitherm, Italy) .....	33
ภาพที่ 3.12 เครื่อง Particle Size Distribution Analyzer PSD .....	34
ภาพที่ 3.13 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)....	35
ภาพที่ 3.14 ก) วางชิ้นทดสอบลงบนภาชนะสเตนเลส ข) นำชิ้นงานใส่เตาอบ ค) เก็บชิ้นงานออกจากเตา และ ง) จุ่มชิ้นงานลงในเมทิลลิโนบลู .....	36
ภาพที่ 3.15 ก) ใส่น้ำครึ่งหนึ่งลงในชิ้นงานตัวอย่าง ข) ต้มน้ำเดือดบนเตาแก๊ส ค) จุ่มชิ้นงานตัวอย่างลงในน้ำทันที และ ง) ตรวจสอบรอยร้าวด้วยเมทิลลิโนบลู .....	37
ภาพที่ 4.1 องค์ประกอบทางเฟสของแร่สปอดูมินก่อนเผาและหลังเผา .....	39
ภาพที่ 4.2 ก) การกระจายตัวขนาดอนุภาคของสปอดูมินก่อนเผาและหลังเผา และ ข) การกระจายตัวสะสมของอนุภาค.....	40
ภาพที่ 4.3 ก) การกระจายตัวขนาดอนุภาคของผงวัตคูดิบ และ ข) การกระจายตัวสะสมของอนุภาค.....	41
ภาพที่ 4.4 ลักษณะทางจุลภาคของวัตคูดิบจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ก) บิ๊ตาสปอดูมิน ข) ทัลค์ ค) ดินคำผง RAA และ ง) อะลูมินา A31 .....	42
ภาพที่ 4.5 องค์ประกอบทางเฟสของผงวัตคูดิบ ก) ทัลค์ (Talc) ข) ดินคำผง RAA (Ball clay) และ ค) อะลูมินา A31 (Alumina) .....	43
ภาพที่ 4.6 ก.) การกระจายตัวขนาดอนุภาคหลังบด 24 ชั่วโมง และ ข.) การกระจายตัวสะสมของอนุภาค.....	46
ภาพที่ 4.7 การหัดตัวรวมของชิ้นงานหลังเผาที่อุณหภูมิ 1220 1250 1280 และ 1310 องศาเซลเซียส.....	48
ภาพที่ 4.8 การดูดซึมน้ำของชิ้นงานหลังเผาที่อุณหภูมิ 1220 1250 1280 และ 1310 องศาเซลเซียส.....	50
ภาพที่ 4.9 ความหนาแน่นของชิ้นงานหลังเผาที่อุณหภูมิ 1220 1250 1280 และ 1310 องศาเซลเซียส.....	51
ภาพที่ 4.10 รอยแตกของชิ้นงานหลังเผาในสูตร CS 0.....	52
ภาพที่ 4.11 รอยแตกของชิ้นงานหลังเผาสูตร CS0-CS10.....	52
ภาพที่ 4.12 ความแข็งแรงหลังเผาของชิ้นงานที่อุณหภูมิ 1250 1280 และ 1310 องศาเซลเซียส .....	53

ภาพที่ 4.13	ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของชิ้นงานหลังเผาที่อุณหภูมิ 1250 1280 และ 1310 องศาเซลเซียส (ทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 25-1000 °C).....	55
ภาพที่ 4.14	เฟสไดอะแกรมของ ระบบ MgO-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiO <sub>2</sub> .....	56
ภาพที่ 4.15	XRD patterns ของชิ้นงาน สูตร CS1- CS10 หลังเผาที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส.....	58
ภาพที่ 4.16	XRD patterns ของชิ้นงาน สูตร CS1- CS10 หลังเผาที่อุณหภูมิ 1280 องศาเซลเซียส.....	59
ภาพที่ 4.17	โครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานสูตร CS4 – CS10 ซึ่งทำการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1280 °C (กำลังขยาย 5000 เท่า) .....	60
ภาพที่ 4.18	โครงสร้างทางจุลภาค (SEM) และการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง (EDX) ของชิ้นงานสูตร CS4 หลังเผาที่อุณหภูมิ 1280 °C (กำลังขยาย 5000 เท่า).....	61
ภาพที่ 4.19	โครงสร้างทางจุลภาค (SEM) และการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง (EDX) ของชิ้นงานสูตร CS5 หลังเผาที่อุณหภูมิ 1280 °C (กำลังขยาย 5000 เท่า).....	62
ภาพที่ 4.20	โครงสร้างทางจุลภาค (SEM) และการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง (EDX) ของชิ้นงานสูตร CS6 หลังเผาที่อุณหภูมิ 1280 °C (กำลังขยาย 2500 เท่า).....	63
ภาพที่ 4.21	โครงสร้างทางจุลภาค (SEM) และการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง (EDX) ของชิ้นงานสูตร CS10 หลังเผาที่อุณหภูมิ 1280 °C (กำลังขยาย 5000 เท่า).....	64
ภาพที่ 4.22	ชิ้นงานตัวอย่าง รูปหม้อ สูตรเนื้อดิน CS6 เผาที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส และ 1280 องศาเซลเซียส.....	67
ภาพที่ 4.23	ทดลองเคลือบชิ้นงานตัวอย่าง เผาที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส .....	68
ภาพที่ 4.24	การทดสอบการใช้งานจริงบนเตาแก๊ส .....	69
ภาพที่ 4.25	ผิวเคลือบร้อนออกจากผิวชิ้นงานตัวอย่างหลังทดสอบการใช้งานจริง .....	69

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในสังคมยุคปัจจุบันที่มีแต่ความเร่งรีบ จึงเกิดสิ่งอำนวยความสะดวกมากมาย ภาชนะเซรามิกสำหรับหุงต้มประเภทสัมผัสเปลวไฟได้โดยตรงก็ถือเป็นทางเลือกทางหนึ่งที่สามารถนำมาใช้ได้ ทั้งกับ เตาไมโครเวฟ เตาอบ เตาไฟฟ้า และเตาแก๊ส สามารถใช้งานทั้งอุ่นอาหาร และปรุงอาหารได้ นอกจากนี้ยังสามารถเก็บความร้อนของอาหารไว้ได้นาน ปัจจุบันผลิตภัณฑ์ประเภทนี้มีทั้งผลิตภัณฑ์ที่ทำจากเซรามิกและแก้ว แต่ส่วนใหญ่เป็นผลิตภัณฑ์แก้ว เช่น แก้วทนไฟและกลาสเซรามิก (glass-ceramic) มีราคาแพง ต้องนำเข้าจากต่างประเทศ โดยวัสดุที่จะนำมาใช้เป็นส่วนผสมในการทำผลิตภัณฑ์ภาชนะเซรามิกสำหรับหุงต้มประเภทสัมผัสเปลวไฟโดยตรง จะต้องมียุทธศาสตร์การขยายตัวทางความร้อน (coefficient of thermal expansion) ต่ำ มีสมบัติทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างเฉียบพลัน จึงสามารถสัมผัสเปลวไฟโดยตรงได้โดยไม่เกิดการแตกร้าวเสียหาย และสามารถใช้งานได้อย่างทนทาน คอร์เดียวไรต์และสปอดูมินเป็นวัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ มีความต้านทานการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างเฉียบพลันได้ดี สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุเพื่อผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ภาชนะเซรามิกสำหรับหุงต้มประเภทสัมผัสเปลวไฟโดยตรงได้<sup>(1)</sup>

สปอดูมินเป็นสารประกอบลิเทียมอะลูมิเนียมซิลิเกต มีสูตรทางเคมีคือ  $\text{Li}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2$  เป็นแหล่งให้ลิเทียมออกไซด์ มีจุดหลอมตัวประมาณ 1423 องศาเซลเซียส แร่สปอดูมินในธรรมชาติมักจะเป็นเฟสแอลฟา ( $\alpha$ -spodumene) ซึ่งไม่เสถียร โดยจะเปลี่ยนเป็นเฟสบีตาสปอดูมิน ( $\beta$ -spodumene) ที่อุณหภูมิสูงกว่า 1080 องศาเซลเซียส และเกิดการขยายตัวอย่างรุนแรง จึงไม่สามารถนำแอลฟาสปอดูมินมาใช้งานผสมเนื้อผลิตภัณฑ์ได้โดยตรง ต้องมีการเผาแคลไซน์ก่อนเสมอ บีตาสปอดูมินมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำประมาณ  $0.9 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  นิยมนำมาใช้ทั้งในอุตสาหกรรมแก้วและเซรามิก โดยในอุตสาหกรรมแก้วเช่น กลาสเซรามิก แก้วทนไฟ เป็นต้น ส่วนอุตสาหกรรมเซรามิกนิยมนำมาผสมทั้งในเนื้อดินและเคลือบเซรามิกเพื่อลดจุดสุกตัว ลดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน เพิ่มความแข็งแรง และลดความหนืดและเพิ่มการหลอมของเคลือบ<sup>(1,2)</sup>

คอร์เดียไรต์เป็นสารประกอบแมกนีเซียมอะลูมิเนียมซิลิเกต มีสูตรทางเคมีคือ  $2\text{MgO}\cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 5\text{SiO}_2$  เป็นวัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำอยู่ระหว่าง  $1.5\text{-}3.0\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  สามารถสังเคราะห์ได้จากทัลค์ ดินขาวและอะลูมินา โดยการเผาที่อุณหภูมิระหว่าง 1250-1350 องศาเซลเซียส<sup>(3)</sup> นิยมนำมาใช้งานที่อุณหภูมิสูง ทำเป็นผลิตภัณฑ์ในอุตสาหกรรมวัสดุทนไฟ เช่น แผ่นรองเผา และผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่เกี่ยวกับเตาเผา เนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ จึงมีความต้านทานการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างเฉียบพลัน<sup>(4)</sup>

ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของส่วนผสมของวัสดุเชิงประกอบสปอคูมิน/คอร์เดียไรต์ที่มีต่อสมบัติต่างๆ หลังเผาที่อุณหภูมิการเผา 1220 1250 1280 และ 1310 องศาเซลเซียส ที่เตรียมได้จากส่วนผสมของบิตาสปอคูมิน ดินดำ อะลูมินา และทัลค์ ขึ้นรูปด้วยวิธีการหล่อแบบ (เซรามิกดั้งเดิม) ให้มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ  $1\text{-}3\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  มีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างเฉียบพลันได้ดีโดยไม่เกิดการแตกร้าว และทดลองขึ้นรูปชิ้นงานตัวอย่าง เพื่อใช้เป็นวัสดุในการผลิตภาชนะเซรามิกสำหรับหุงต้มประเภทสัมผัสเปลวไฟโดยตรง

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาผลของส่วนผสมของวัสดุเชิงประกอบสปอคูมิน/คอร์เดียไรต์ ที่มีต่อสมบัติต่างๆ หลังเผาโดยเฉพาะการสุกตัว และความต้านทานการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างเฉียบพลัน เพื่อใช้เป็นวัสดุในการผลิตภาชนะเซรามิกสำหรับหุงต้มประเภทสัมผัสเปลวไฟโดยตรง

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ศึกษาอัตราส่วนผสมของสปอคูมิน/คอร์เดียไรต์ และสภาวะการเผาที่เหมาะสมที่ทำให้เนื้อดินมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ มีความหนาแน่นสูง ทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างเฉียบพลันได้ดี

2. ทดลองขึ้นรูปชิ้นงานตัวอย่างเพื่อเป็นผลิตภัณฑ์ต้นแบบ

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้ส่วนผสมและอุณหภูมิการเผาที่เหมาะสมของวัสดุเชิงประกอบสปอคูมิน/คอร์เดียไรต์ เพื่อเป็นวัสดุในการผลิตภาชนะเซรามิกหุงต้มประเภทสัมผัสเปลวไฟได้โดยตรง

## บทที่ 2

### ปรีทัศน์วรรณกรรม

#### 2.1 ภาชนะหุงต้ม

เนื้อดินเซรามิก สามารถนำมาประยุกต์ผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ประเภทต่างๆ ได้มากมาย โดยตั้งแต่ปีคริสต์ศักราช 1950 เป็นต้นมา ได้มีการพัฒนาทำให้ผลิตภัณฑ์เซรามิกมีคุณสมบัติพิเศษต่างๆ มากมาย โดยนำไปใช้เป็นส่วนวัสดุอิเล็กทรอนิกส์ (electrical ware) ชิ้นส่วนฉนวนไฟฟ้า วัสดุขัดเจียร (cutting tool) ชิ้นส่วนยานอวกาศ (part of the spacecraft) ภาชนะบนโต๊ะอาหารและเครื่องครัว (tableware and kitchenware) เครื่องประดับตกแต่ง (decoration & garden ware) เครื่องสุขภัณฑ์ (sanitaryware) และชิ้นส่วนในร่างกายมนุษย์ (bioceramic)<sup>(5)</sup> เป็นที่รู้จักกันทั่วไปว่า เซรามิกสามารถนำมาผลิตเป็นภาชนะเซรามิกที่ใช้บนโต๊ะอาหาร ได้แก่ จาน ชาม กาน้ำ แก้ว และช้อน เป็นต้น ใส่อาหารได้ทั้งร้อนและเย็น ภาชนะประเภทนี้ใช้งานในเตาไมโครเวฟได้โดยไม่เกิดการแตกร้าว เนื้อดินที่นำมาผลิตเป็นภาชนะเซรามิกที่ใช้บนโต๊ะอาหารเซรามิกแบ่งออกได้เป็นหลายชนิดต่างๆ ตามคุณภาพเนื้อของผลิตภัณฑ์ ดังนี้

1. เอิร์ธเอนแวร์ (earthenware) เเผาที่อุณหภูมิประมาณ 1000 - 1150 องศาเซลเซียส เนื้อดินหลังเผามีสีตั้งแต่สีขาวจนถึงแดง เนื้อดินความแข็งแรงต่ำ มีความพรุนตัวและการดูดซึมน้ำสูง 10 - 15 เปอร์เซ็นต์ เตรียมได้จาก ดินขาว 30 เปอร์เซ็นต์ ดินดำ 30 เปอร์เซ็นต์ เฟลด์สปาร์ 30 เปอร์เซ็นต์ และ ควอตซ์ 10 เปอร์เซ็นต์ นำมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น กระเบื้องมุงหลังคา จาน และชาม เป็นต้น <sup>(1, 6-8)</sup> ดังภาพที่ 2.1 <sup>(9)</sup>



ภาพที่ 2.1 ภาชนะเซรามิกผลิตจากเนื้อดินเอิร์ธเอนแวร์



2. เทอราคอตตา (terra cotta) เเผาที่อุณหภูมิประมาณ 1000 - 1150 องศาเซลเซียส เนื้อดินหลังเผาจะมีสีแดง เนื้อดินความแข็งแรงต่ำ มีความพรุนตัวและการดูดซึมน้ำสูง 10 - 15 เปอร์เซ็นต์ เตรียมได้จาก ดินแดง 50 เปอร์เซ็นต์ ดินดำ 30 เปอร์เซ็นต์ เฟลด์สปาร์ 10 เปอร์เซ็นต์ และ ควอตซ์ 10 เปอร์เซ็นต์ นำมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น กระจาดต้นไม้ หม้อดินเผา กระเบื้องมุงหลังคา จาน และชาม เป็นต้น<sup>(6, 10)</sup> ดังภาพที่ 2.2<sup>(11)</sup>



ภาพที่ 2.2 ภาชนะเซรามิกผลิตจากเนื้อดินเทอราคอตตา

2. สโตนแวร์ (stoneware) เเผาที่อุณหภูมิประมาณ 1230 - 1250 องศาเซลเซียส เนื้อดินหลังเผาจะมีสีตั้งแต่สีขาวถึงสีเทา เนื้อดินมีความแข็งแรง เคาะมีเสียงดังกังวาน มีความพรุนตัวและค่าการดูดซึมน้ำต่ำ 0 - 5 เปอร์เซ็นต์ เตรียมได้จาก ดินขาว 60 เปอร์เซ็นต์ ดินดำ 20 เปอร์เซ็นต์ เฟลด์สปาร์ 10 เปอร์เซ็นต์ และ ควอตซ์ 10 เปอร์เซ็นต์ นำมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น จาน ชาม แจกัน กาน้ำ โอ่งมังกร เป็นต้น<sup>(6, 10, 12)</sup> ดังภาพที่ 2.3<sup>(13)</sup>



ภาพที่ 2.3 ภาชนะเซรามิกผลิตจากเนื้อดินสโตนแวร์

3. ปอร์ซเลน (porcelain) เเผาที่อุณหภูมิประมาณ 1280 - 1400 องศาเซลเซียส เนื้อดินหลังเผา มีสีตั้งแต่สีขาว เนื้อดินถ้าเผาสูงจะ โปร่งแสงได้ เนื้อดินมีความแข็งแกร่งสูง เคาะมีเสียงดังกังวาน มีความพรุนตัวและค่าการดูดซึมน้ำต่ำ 0 - 0.5 เปอร์เซ็นต์ เตรียมได้จาก ดินขาว 50 เปอร์เซ็นต์ เฟลด์สปาร์ 25 เปอร์เซ็นต์ และ ควอตซ์ 25 เปอร์เซ็นต์ นำมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น จาน ชาม แจกัน กาน้ำ เป็นต้น <sup>(1, 6, 8, 10, 14)</sup> ดังภาพที่ 2.4 <sup>(15)</sup>



ภาพที่ 2.4 ภาชนะเซรามิกผลิตจากเนื้อดินปอร์ซเลน

4. โบนไชนา (bone china) เเผาที่อุณหภูมิประมาณ 1200 องศาเซลเซียส เนื้อดินหลังเผา มีสีตั้งแต่สีขาวจนถึงครีม มีความโปร่งแสง เนื้อดินมีความแข็งแกร่งสูง เคาะมีเสียงดังกังวาน มีความพรุนตัวและค่าการดูดซึมน้ำต่ำ 0 - 0.2 เปอร์เซ็นต์ เตรียมได้จาก แก้วกระดูก 50 เปอร์เซ็นต์ ดินขาว ดินดำ เฟลด์สปาร์ และ ควอตซ์ นำมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น จาน ชาม เครื่องประดับ เป็นต้น <sup>(1, 6, 16)</sup> ดังภาพที่ 2.5 <sup>(17)</sup>



ภาพที่ 2.5 ภาชนะเซรามิกผลิตจากเนื้อดินโบนไชนา

เนื้อดินต่างๆเหล่านี้มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนสูง  $4-7 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  ดังตารางที่ 2.1<sup>(18-20)</sup> ไม่สามารถนำมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์สำหรับใช้ในเตาอบที่มีอุณหภูมิสูงประมาณ 350 องศาเซลเซียส หรือผลิตภัณฑ์ที่ทนความร้อน (heat resistant ware) สำหรับใช้ทำอาหารหรือปรุงอาหารบนเตาแก๊สที่มีอุณหภูมิสูงถึง 600-700 องศาเซลเซียส เนื่องจากไม่สามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างเฉียบพลันได้ เนื้อดินที่สามารถนำมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ทนความร้อนจะต้องมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำประมาณ  $2-3 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ <sup>(1)</sup>

ตารางที่ 2.1 ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของเนื้อดินชนิดต่างๆ

ชนิดเนื้อดิน	ค่าการดูดซึมน้ำ (%)	ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน ( $\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )
เอิร์ธเร็นแวร์	10-15	6-7
เทอราคอตตา	10-15	6-7
สโตนแวร์	0-5	6.5-7.6
ปอร์ซเลน	0-0.5	5.5-7
บอนไซนา	0-0.2	4

## 2.2 ภาชนะเซรามิกหุงต้ม

ภาชนะที่ใช้สำหรับหุงต้ม (cooking ware) เป็นเครื่องครัวชนิดหนึ่ง (kitchenware) เช่น หม้อ และ กระทะ เป็นต้น ทำจากวัสดุชนิดต่างๆ เช่น สแตนเลส เหล็ก อะลูมิเนียม แก้วเซรามิก แก้ว อีนาเมลและ เซรามิก สามารถนำมาปรุงอาหารได้ทั้งบนเตาแก๊ส เตาไฟฟ้า เตาอบและ เตาไมโครเวฟ วัสดุเซรามิกก็ถือว่าเป็นวัสดุหนึ่งที่ทำมาทำภาชนะหุงต้มแล้วให้น้ำหนักเบาว่า สแตนเลส สามารถเก็บความร้อนได้นาน ไม่เกิดการสะท้อนกลับของคลื่นไมโครเวฟ วัสดุเซรามิกที่จะนำมาผลิตภาชนะเซรามิกหุงต้มสามารถนำมาขึ้นรูปด้วยวิธีง่ายๆ โดยไม่ต้องใช้เครื่องจักรที่มีเทคโนโลยีสูง และมีการลงทุนน้อยกว่าวัสดุอื่นๆ ที่กล่าวมาข้างต้น เช่น การขึ้นรูปด้วยปั้นหมุน ดังภาพที่ 2.6<sup>(21)</sup>

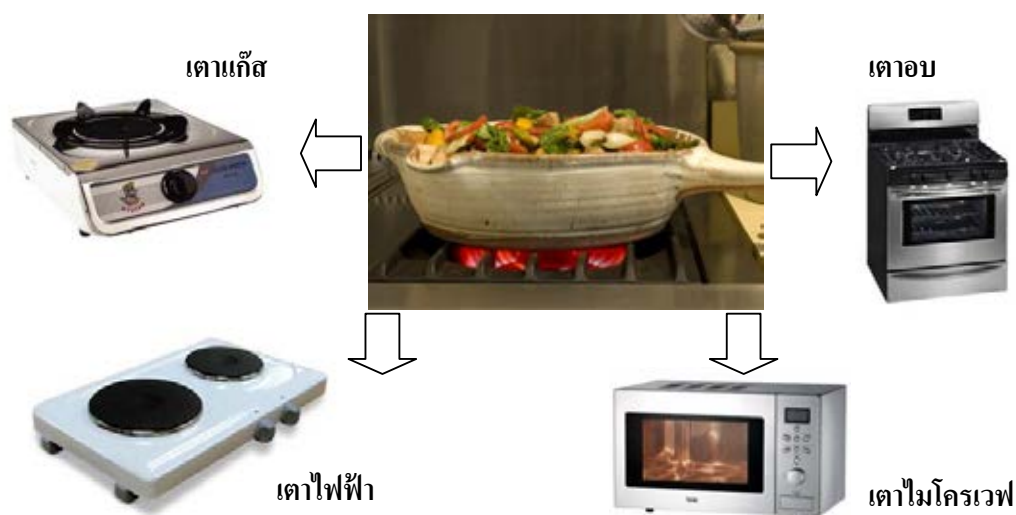


ภาพที่ 2.6 ภาชนะเซรามิกหุงต้มที่ขึ้นรูปด้วยวิธีปั้นเป็นหมุน

ภาชนะเซรามิกหุงต้ม (ceramic cookware) มีหลายประเภทขึ้นอยู่กับการใช้งาน เช่น

- ภาชนะเซรามิกหุงต้มประเภทใช้กับเตาอบ (ovenware) วัสดุที่จะนำมาผลิตภาชนะประเภทนี้ควรจะต้องมีสมบัติดังนี้ คือ มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำกว่า  $1-4.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  ต้องทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างเฉียบพลันได้ที่อุณหภูมิมากกว่า 150 องศาเซลเซียส<sup>(1, 22)</sup>

- ภาชนะเซรามิกหุงต้มประเภทสัมผัสเปลวไฟโดยตรง (flameware) สามารถนำมาปรุงอาหารได้โดยตรงบนเตาแก๊ส วัสดุที่จะนำมาผลิตภาชนะประเภทนี้ควรจะต้องมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำประมาณ  $2-3 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ <sup>(1)</sup> มีความแข็งแรงสูง และมีค่าการดูดซึมน้ำต่ำกว่า 8 เปอร์เซ็นต์ และทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างเฉียบพลันได้มากกว่า 250 องศาเซลเซียส<sup>(22)</sup> โดยไม่เกิดการแตกร้าว มีความทนทานและอายุการใช้งานที่ยาวนาน นอกจากนี้ยังสามารถใช้งานบนเตาไฟฟ้า เตาอบ และเตาไมโครเวฟได้ ดังภาพที่ 2.7<sup>(23-27)</sup>



ภาพที่ 2.7 ภาชนะเซรามิกหุงต้มประเภทสัมผัสเปลวไฟโดยตรง

ภาชนะเซรามิกหุงต้มประเภทสัมผัสเปลวไฟโดยตรง มีทั้งแบบที่มีผิวเคลือบโดยแบบที่มีผิวเคลือบก็จะมีชั้นเคลือบปกปิดผิวทั้งด้านนอกและด้านใน และเคลือบอาจมีสีสันทันได้หลากหลาย ดังภาพที่ 2.8 ส่วนแบบที่ไม่มีผิวเคลือบจะพบสีของเนื้อดินหลังเผา ดังภาพที่ 2.9 โดยผิวภาชนะของทั้ง 2 แบบ นั้นจะต้องสามารถล้างทำความสะอาดได้ง่ายทั้งด้านนอกและด้านใน<sup>(22)</sup>

- แบบที่มีผิวเคลือบ ดังภาพที่ 2.8<sup>(28)</sup> เนื้อดินอาจมีค่าการดูดซึมน้ำที่สูงกว่า 10 เปอร์เซ็นต์ได้ แต่เคลือบจะต้องไม่มีส่วนผสมของโลหะหนัก เช่น ตะกั่ว และ แคดเมียม ซึ่งเป็นพิษต่อร่างกาย ถ้ามีสะสมในปริมาณที่มากเพียงพอ โดยโลหะหนักสามารถละลายปนมากับอาหารได้หากนำไปใช้ปรุงอาหารที่มีฤทธิ์เป็นกรด ดังนั้นไม่ควรนำวัสดุดังกล่าวมาเป็นส่วนผสมในน้ำเคลือบ

- แบบที่ไม่มีผิวเคลือบ ดังภาพที่ 2.9<sup>(29, 30)</sup> เนื้อดินจะต้องมีค่าการดูดน้ำต่ำกว่า 8 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งถ้าผิวมีค่าการดูดซึมน้ำสูงในขณะที่ปรุงอาหารน้ำจากอาหารอาจซึมผ่านเข้าไปในเนื้อดินภายในได้ ทำให้สิ่งเสียดอาหารออกไม่หมด ทำให้มีเสียดอาหารตกค้างสะสมเชื้อโรค ซึ่งอาจก่อให้เกิดอันตรายต่อผู้บริโภคได้ และบริเวณที่สัมผัสเปลวไฟโดยตรงอาจเกิดมีเขม่าของเปลวไฟที่เผาไหม้ไม่สมบูรณ์ติดอยู่ที่ผิวด้านนอก ทำให้ผิวของภาชนะไม่สวยงาม



ภาพที่ 2.8 ภาชนะเซรามิกหุงต้มๆ ที่มีผิวเคลือบ



ภาพที่ 2.9 ภาชนะเซรามิกหุงต้มๆ ไม่มีผิวเคลือบ

วัสดุที่สามารถนำมาผลิตเป็นภาชนะประเภทนี้ได้ จะต้องเป็นวัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ มีความต้านทานการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างเฉียบพลันได้ดี วัสดุที่นิยมนำมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ประเภทนี้ได้มีทั้งแก้วและเซรามิกดังนี้<sup>(31)</sup>

1. แก้วโบโรซิลิเกต มีชื่อเรียกทางการค้าว่า Pyrex เป็นวัสดุประเภทแก้วทนไฟ มีใช้โดยทั่วไปในห้องปฏิบัติการทางเคมี และใช้ทำภาชนะหุงต้มเนื่องจากมีความใส สามารถมองเห็นอาหารได้จากภายนอก ผลิตด้วยวิธีการหลอมที่อุณหภูมิสูงประมาณ 1500 องศาเซลเซียส ใช้เครื่องจักรที่มีราคาแพงและมีต้นทุนการผลิตสูง วัสดุชนิดนี้จึงมีราคาแพง ดังภาพที่ 2.10<sup>(32)</sup>



ภาพที่ 2.10 ภาชนะเซรามิกหุงต้มที่ทำจากแก้วโบโรซิลิเกต

2. กلاسเซรามิก (glass-ceramic) ผลิตด้วยวิธีการหลอม ที่อุณหภูมิสูงประมาณ 1500 องศาเซลเซียส แล้วนำมาให้ความร้อนซ้ำอีกครั้งเพื่อตกผลึกที่อุณหภูมิประมาณ 900 องศาเซลเซียส ได้แก่ ผลึกของสปอคูมินและคอร์เดียไรต์<sup>(33)</sup> ผลิตด้วยเครื่องจักรที่มีราคาแพงและมีต้นทุนการผลิตสูง วัสดุชนิดนี้จึงมีราคาแพง ดังภาพที่ 2.11<sup>(34)</sup>



ภาพที่ 2.11 ภาชนะเซรามิกหุงต้มที่ทำจากกلاسเซรามิก

3. อะลูมิเนียมไททานิค สามารถสังเคราะห์ได้จาก อะลูมินา และไททานีย แล้วนำมาเผาผนึกที่อุณหภูมิสูงประมาณ 1500 -1600 องศาเซลเซียส<sup>(35, 36)</sup> ไททานีย เป็นวัสดุที่มีราคาแพง และต้องเผาผนึกที่อุณหภูมิ จึงทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจากวัสดุนี้มีราคาแพง

4. คอร์เดียไรต์ สามารถสังเคราะห์ได้จาก ทัลค์ ดิน และอะลูมินา นำมาเผาผนึกที่อุณหภูมิสูงประมาณ 1300 องศาเซลเซียส<sup>(31)</sup> สามารถขึ้นรูปได้ด้วยวิธีการขึ้นรูปแบบดั้งเดิมคือ วิธีการหล่อแบบ ปั้นเป็นหมุน เป็นดิน เป็นวัสดุที่มีราคาไม่แพง ดังภาพที่ 2.12



ภาพที่ 2.12 ภาชนะเซรามิกหุงต้มที่ทำจากคอร์เดียไรต์

5. สปอดูมิน เป็นแร่ที่ได้มาจากธรรมชาติ มีปริมาณมากที่ สหรัฐอเมริกา ออสเตรเลีย และจีน เป็นดิน<sup>(37)</sup> สามารถขึ้นรูปได้ด้วยวิธีการขึ้นรูปแบบดั้งเดิมคือ วิธีการหล่อแบบ เป็นดิน เป็นวัสดุที่มีราคาไม่แพง ดังภาพที่ 2.13



ภาพที่ 2.13 ภาชนะเซรามิกหุงต้มที่ทำจากสปอดูมิน



คอร์เดียไรต์และสปอดูมิน เป็นวัสดุที่มีราคาไม่แพง สามารถขึ้นรูปได้ด้วยวิธีการขึ้นรูปแบบดั้งเดิม ในการทดลองนี้จึงสนใจที่จะนำวัสดุสปอดูมินและคอร์เดียไรต์นำมาผสมกันเป็นวัสดุเชิงประกอบ มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ สามารถทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างเฉียบพลันได้ดี ขึ้นรูปด้วยวิธีหล่อแบบโดยใช้แบบพิมพ์ปูนปลาสเตอร์ เพื่อนำมาผลิตเป็นภาชนะเซรามิกหุงต้มที่สามารถสัมผัสไฟโดยตรงได้

### 2.3 แร่สปอดูมิน

สปอดูมินเป็นสารประกอบลิเทียมอะลูมิเนียมซิลิเกต มีสูตรทางเคมีคือ  $\text{Li}_2\text{O}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 4\text{SiO}_2$  เป็นแหล่งให้ลิเทียมออกไซด์ ( $\text{Li}_2\text{O}$ ) ในปริมาณ 4-7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ขึ้นอยู่กับความบริสุทธิ์ของแร่ มีจุดหลอมตัวประมาณ 1423 องศาเซลเซียส มีค่าความแข็งที่ 6.9 โมห์สเกล เป็นแร่ธรรมชาติที่มีจำนวนมาก พบมากที่ประเทศ สหรัฐอเมริกา และออสเตรเลีย แร่สปอดูมินที่พบในธรรมชาติดังภาพที่ 2.14 <sup>(38)</sup> มักจะเป็นเฟสแอลฟา ( $\alpha$ -spodumene) ซึ่งไม่เสถียร และมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางร้อนสูงประมาณ  $4.0 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  เมื่อนำมาเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิสูงกว่า 1080 องศาเซลเซียส จะเปลี่ยนจากเฟสแอลฟาเป็นเฟสบีตาสปอดูมิน ( $\beta$ -spodumene) ระหว่างการเปลี่ยนเฟสจะเกิดการขยายตัวอย่างรุนแรง ค่าความถ่วงจำเพาะ (specific gravity) เปลี่ยนจาก 3.2 ไปเป็น 2.4 มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางร้อนต่ำลงอยู่ที่ประมาณ  $0.9 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  ในการใช้งานจึงนิยมนำแร่สปอดูมินมาเผาแคลไซน์ให้เป็นบีตาสปอดูมินก่อนนำไปใช้<sup>(2)</sup> สปอดูมินให้ลิเทียมออกไซด์ ทำให้เมื่อเติมลงไปในน้ำดินและเคลือบจะเป็นตัวช่วยหลอมละลาย (flux) ที่ดีกว่าเฟลด์สปาร์ ทำให้มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำลง และมีความทนไฟต่ำลง<sup>(2, 39)</sup> ดังนั้นจึงนิยมนำมาใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมแก้วและเซรามิกมากมาย<sup>(37)</sup> ดังนี้



ภาพที่ 2.14 แร่สปอดูมิน (Spodumene)



## การใช้ประโยชน์สปอคูมินในอุตสาหกรรมต่าง ๆ

### การใช้สปอคูมินในอุตสาหกรรมแก้ว

- การเติมแร่สปอคูมินลงไปแก้วเพื่อเป็นตัวช่วยลดความหนืดของน้ำแก้ว ลดปัญหาฟองอากาศในเนื้อแก้ว เพิ่มความใสของแก้ว และช่วยลดสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน

- การเติมสปอคูมินลงในกลาสเซรามิก ทำให้กลาสเซรามิกที่ได้มีการขยายตัวทางความร้อนต่ำ ทนต่อปฏิกิริยาเคมี และมีความแข็งแรงเชิงกลที่ดี<sup>(33)</sup>

### การใช้สปอคูมินในอุตสาหกรรมเซรามิก

- การเติมสปอคูมินลงไปเนื้อดิน ทำให้สามารถลดอุณหภูมิในการเผาได้ 30-50 องศาเซลเซียส ลดเวลาในการเผา (firing cycle) และมีสิ่งเจือปน (impurity) ต่ำกว่าเฟลด์สปาร์ทั่วไป ทำให้ชิ้นงานหลังเผามีความขาวมากขึ้น<sup>(40, 41)</sup> และยังเป็นตัวเติมที่ช่วยในการเผาผนึกของอะลูมินา (Alumina)<sup>(42)</sup> อะลูมิเนียมไททานेट (Aluminium Titanate)<sup>(43)</sup> และ มุลไลต์ (Mullite)<sup>(44)</sup>

- การเติมสปอคูมินลงไปเคลือบ ช่วยลดความหนืดของเคลือบขณะหลอมตัว ทำให้ลดปัญหาการเกิดรูเข็ม (pin hole) บนผิวเคลือบ และยังเพิ่มความทนทานต่อสารเคมี ทำให้ผิวเคลือบแข็งขึ้น

## 2.4 คอร์ดีไรต์

คอร์ดีไรต์เป็นสารประกอบแมกนีเซียมอะลูมิเนียมซิลิเกต มีสูตรทางเคมีคือ  $2\text{MgO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{SiO}_2$  เป็นวัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ  $1.5\text{-}3.0 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  เป็นแร่ที่พบน้อยมากในธรรมชาติ มีลักษณะดังภาพที่ 2.15<sup>(45)</sup> ดังนั้นในการใช้งานทั่วไปจึงต้องสังเคราะห์ โดยสามารถสังเคราะห์ได้จาก ทัลค์ ดินขาว และอะลูมินา เผาที่อุณหภูมิระหว่าง 1250-1350 องศาเซลเซียส เนื่องจากคอร์ดีไรต์มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่มีคอร์ดีไรต์เป็นส่วนผสม สามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างเฉียบพลัน มีความทนไฟสูง และทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมี สามารถนำมาขึ้นรูปได้ด้วยวิธีต่างๆ



ภาพที่ 2.15 แร่คอร์ดีไรต์ (Cordierite)

เนื้อคอร์เดียไรต์มีสมบัติที่ดีหลายประการทำให้สามารถประยุกต์ใช้กับงานต่างๆ ได้มากมาย นิยมนำมาใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมต่างๆ ดังนี้

#### การใช้ประโยชน์คอร์เดียไรต์ในอุตสาหกรรมต่างๆ

##### อุตสาหกรรมเซรามิก

- นำมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์วัสดุทนไฟ เกี่ยวกับอุปกรณ์ในเตาเผาต่างๆ เช่น แผ่นรองเผา ขาดังแผ่นรองเผา เป็นต้น เนื่องจากมีความทนไฟสูง และทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างเฉียบพลัน<sup>(46)</sup> และมีราคาที่ไม่แพง

- นำมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ภาชนะเซรามิกหุงต้ม สามารถขึ้นรูปได้ด้วยวิธีการผลิตเซรามิกแบบดั้งเดิม<sup>(1)</sup> ไม่ต้องใช้เครื่องจักรที่มีราคาแพง ผลิตภัณฑ์มีราคาถูก เนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ และมีทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างเฉียบพลันได้ดี

##### อุตสาหกรรมยานยนต์

- นำมาผลิตเป็นเซรามิกกรองฝุ่น ใช้ติดตั้งอยู่กับระบบท่อไอเสียของเครื่องยนต์ เรียกว่า คะตะลิติกคอนเวอร์เตอร์ (catalytic converter) ตัวกรองอนุภาคในเครื่องยนต์ดีเซล (diesel particulate filter) เพื่อกำจัดฝุ่นหรือเขม่าจากท่อไอเสยรถยนต์ในเครื่องยนต์ดีเซล เนื่องจากมีความเสถียรที่อุณหภูมิสูง และสามารถต้านทานต่อการกัดกร่อนและการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ดี<sup>(47)</sup>

## 2.5 วัสดุเชิงประกอบ

วัสดุเชิงประกอบเป็นระบบของวัสดุซึ่งประกอบด้วยของผสมที่แตกต่างกันตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปและไม่ละลายเข้าด้วยกัน วัสดุเชิงประกอบประกอบด้วย 2 เฟส คือ เฟสที่ 1 เรียกว่า เนื้อพื้น (matrix) มีลักษณะเป็นพื้นที่ต่อเนื่องและล้อมรอบเฟสที่ 2 ไว้ ส่วนเฟสที่ 2 เรียกว่า ตัวเสริมแรง (reinforcement) หรือเฟสที่กระจายตัวอยู่ในเนื้อพื้น วัตถุประสงค์ของการสร้างวัสดุเชิงประกอบเพื่อให้ได้วัสดุที่ดีและมีสมบัติที่ดีมากขึ้นกว่าเดิม หรือมีลักษณะที่สำคัญบางอย่างแตกต่างไปจากเดิม วัสดุเชิงประกอบสามารถจำแนกได้เป็นหลายชนิด ตามชนิดของเนื้อพื้น ได้แก่

- วัสดุเชิงประกอบเนื้อพื้น เซรามิก (ceramic matrix composites, CMCs)
- วัสดุเชิงประกอบเนื้อพื้น พอลิเมอร์ (polymer matrix composites, PMCs)
- วัสดุเชิงประกอบเนื้อพื้น โลหะ (metal matrix composites, MMCs) เป็นต้น<sup>(48, 49)</sup>

ในงานวิจัยนี้จะศึกษาวัสดุเชิงประกอบเนื้อพื้น เซรามิก เป็นหลัก

## 2.6 วัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ

ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน (thermal expansion coefficient) คือ ค่าของความแตกต่างของความยาวหรือปริมาตรของชิ้นงานที่เปลี่ยนไปเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป 1 องศาเซลเซียส การวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนนิยมใช้เครื่องมือที่เรียกว่า เครื่องไคลลาโตมิเตอร์ (dilatometer) โดยวัสดุแต่ละชนิดมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับหลายองค์ประกอบ คือ องค์ประกอบทางเคมี อุณหภูมิของจุดหลอมตัว โครงสร้างผลึก อุณหภูมิในการเผา และความหนาแน่นของชิ้นงาน สำหรับวัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ จะทำให้วัสดุนั้นมีสมบัติความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างเฉียบพลัน (thermal shock resistance) ได้ดี ตัวอย่างวัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ<sup>(20, 50)</sup> ดังตารางที่ 2.2<sup>(50, 51)</sup>

ตารางที่ 2.2 วัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ

วัสดุ	ระบบ	อุณหภูมิ (°C)	ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน ( $\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )
Cordierite	$2\text{MgO}\cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 5\text{SiO}_2$	25-800	1.4
$\beta$ -Spodumene	$\text{Li}_2\text{O}\cdot \text{Al}_2\text{O}_3\cdot 4\text{SiO}_2$	25-1000	0.9
$\beta$ -Eucryptite	$\text{Li}_2\text{O}\cdot \text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2$	25-1000	-6.2
Petalite	$\text{Li}_2\text{O}\cdot \text{Al}_2\text{O}_3\cdot 8\text{SiO}_2$	25-1000	0.3
Aluminum Titanate	$\text{Al}_2\text{TiO}_5$	25-800	1.4
Borosilicate glass (Pyrex)	$\text{SiO}_2\cdot \text{B}_2\text{O}_3$ glass	25-1000	0.5
Titanium Silicate	$\text{SiO}_2\cdot \text{TiO}_2$ glass	25-800	-0.03 to 0.05
Zerodur	LAS (glass ceramic)	20-600	0.12
Pyroceram	LAS + $\text{TiO}_2$	-	-0.07 to 1.30

หมายเหตุ LAS คือระบบ Lithium-Alumina-Silica ( $\text{Li}_2\text{O}\cdot \text{Al}_2\text{O}_3\cdot \text{SiO}_2$ )

## 2.7 วัสดุที่มีความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างเฉียบพลัน

วัสดุจะเกิดการขยายตัวและหดตัวหลังจากได้รับอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปจากเดิม วัสดุส่วนใหญ่จะเกิดการขยายตัวเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น และจะหดตัวกลับเมื่ออุณหภูมิลดลง ถ้าวัสดุได้รับเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างช้าๆ จะเกิดการขยายหรือหดตัวขึ้นอย่างช้าๆ จนทั่วถึงทั้งชิ้น แต่หากวัสดุถูกกระทำให้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว (thermal shock) ผิวด้านนอกของวัสดุจะเกิดการขยายหรือหดตัวอย่างรุนแรงทันที ในขณะที่เนื้อวัสดุที่อยู่ข้างในไม่มีการขยายหรือหดตัวตามผิวด้านนอก ผลก็คือเกิดความแตกต่างของการขยายหรือหดตัวระหว่างผิวด้านนอกและเนื้อวัสดุข้างใน ซึ่งจะทำให้เกิดความเค้นขึ้นในเนื้อวัสดุและเกิดการแตกร้าวขึ้นในที่สุด สมบัติของวัสดุที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างเฉียบพลันมี 4 ประการ ดังความสัมพันธ์ต่อไปนี้<sup>(2, 52)</sup>

$$R = \frac{\sigma \lambda}{\alpha E}$$

เมื่อ	R	คือ	ค่าความต้านทานการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างเฉียบพลัน
	$\sigma$	คือ	ค่าความแข็งแรง (Strength)
	$\lambda$	คือ	ค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity)
	$\alpha$	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน
	E	คือ	ค่ามอดุลัสยืดหยุ่น (Modulus of elasticity)

## 2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วิลไรต์น์ โกลุพพอร์น<sup>(47)</sup> ศึกษาการขึ้นรูปและลักษณะสมบัติของเซรามิกวงผึ้งคอร์เดียไรต์ จากของเสียในอุตสาหกรรมวัสดุทนไฟ โดยเตรียมวัสดุคอร์เดียไรต์จากส่วนผสมของดินขาวระนอง อะลูมินา (AM-21) และทัลค์ ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมเซรามิกในประเทศไทยอย่างแพร่หลาย เเผาที่อุณหภูมิระหว่าง 1250-1350 องศาเซลเซียส พบว่าการเผาที่ 1300 องศาเซลเซียส เกิดเฟสคอร์เดียไรต์เพียงเฟสเดียว แต่ชิ้นงานที่เตรียมได้ยังมีค่าการดูดซึมน้ำสูง 12.47 เปอร์เซ็นต์ และ ค่าความแข็งแรงต่ำ 24.91 เมกะพาสคัลซึ่งยังไม่เหมาะสมที่จะนำมาผลิตเป็นภาชนะเซรามิกสำหรับหุงต้ม

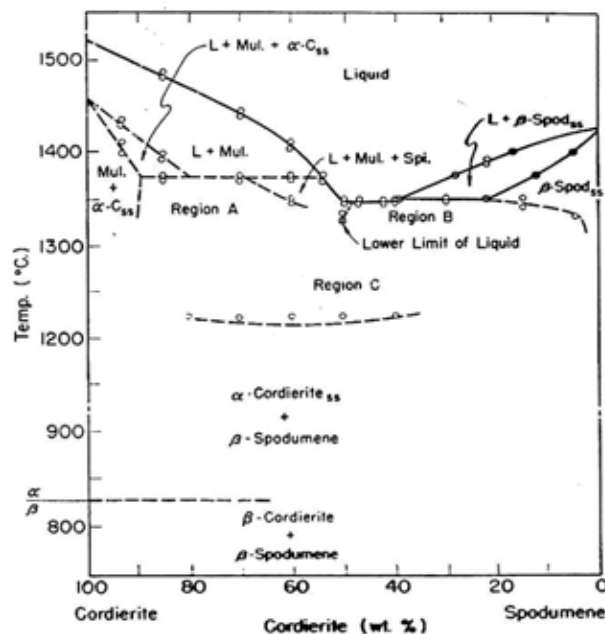
Tumanov, S. G. และ คณะ<sup>(40)</sup> ศึกษาผลของการแทนที่ เฟลด์สปาร์ ด้วย บีตาสโปดิวิน ในเนื้อดินปอร์ซเลน เนื่องจากสโปดิวินเป็นตัวช่วยหลอมที่ใช้ทั้งในอุตสาหกรรมเซรามิกและแก้ว เมื่อเติมบีตาสโปดิวินลงไป 3.4 เปอร์เซ็นต์ ในเนื้อดินปอร์ซเลนแทนเฟลด์สปาร์ ผลการทดลองพบว่าสามารถลดอุณหภูมิในการเผา 70 องศาเซลเซียส และเพิ่มช่วงการเผาให้กว้างขึ้นจากเดิม 20 องศาเซลเซียส ชิ้นงานที่เตรียมได้มีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น

Fishwick, J. H. และ คณะ<sup>(53)</sup> ศึกษาการเตรียมผลิตภัณฑ์เซรามิกสโปดิวินโดยใช้ส่วนผสมของสโปดิวินและดิน โดยนำแร่สโปดิวินเผาแคลไซต์ที่อุณหภูมิ 1080 องศาเซลเซียส ให้เปลี่ยนเฟสเป็นบีตาสโปดิวิน จากนั้นนำบีตาสโปดิวินผสมกับดินขาวในอัตราส่วนต่างๆ ตั้งแต่ 0-100 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เเผาที่อุณหภูมิที่ 1300-1400 องศาเซลเซียส ได้ชิ้นงานที่ประกอบด้วยเฟส บีตาสโปดิวิน มุลไลต์ คริสโทบาไลต์ และควอตซ์ซึ่งเฟสต่างๆ เหล่านี้ส่งผลทำให้เนื้อดินที่เตรียมได้มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนที่สูงขึ้นและมีความแข็งแรงต่ำ

Gouda, A และ คณะ<sup>(31)</sup> ศึกษาการเตรียมเนื้อดินเพื่อผลิตเป็นภาชนะเซรามิกหุงต้มของเนื้อดินคอร์เดียไรต์ เนื้อดินสโปดิวิน และเนื้อดินไททานิต โดยเนื้อดินคอร์เดียไรต์ เตรียมจาก ดิน 40-60 เปอร์เซ็นต์ เฟลด์สปาร์ 5-15 เปอร์เซ็นต์ ทัลค์ 25-40 เปอร์เซ็นต์ และซิลิกา 5-10 เปอร์เซ็นต์ เนื้อดินสโปดิวินเตรียมจาก ดินดำ 35-65 เปอร์เซ็นต์ ซิลิกา 30-55 เปอร์เซ็นต์ และลิเทียมคาร์บอเนต 8-13 เปอร์เซ็นต์ และเนื้อดินไททานิตเตรียมจาก ดิน 45-60 เปอร์เซ็นต์ เฟลด์สปาร์ 10-25 เปอร์เซ็นต์ ทัลค์ 0-20 เปอร์เซ็นต์ และอะนาเทต 5-12 เปอร์เซ็นต์ เเผาที่อุณหภูมิ 1280 องศาเซลเซียส ขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์รูปหม้อต้มอาหาร นำชิ้นงานที่เผาแล้วจำนวน 25 ตัวอย่าง ทดสอบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างเฉียบพลัน โดยนำไปใส่น้ำต้มให้เดือดจนน้ำระเหยหมดบนเตาแก๊สจุ่มลงน้ำทันที พบว่าเนื้อดินแมกนีเซียและลิเทียม ผ่านการทดสอบ 93-95 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่เนื้อไททานิตผ่านเพียง 73 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นวัสดุคอร์เดียไรต์และสโปดิวินเหมาะที่จะนำมาผลิตเป็นภาชนะเซรามิกหุงต้มประเภทสัมผัสความร้อนโดยตรง

Shyu, J. J. และ คณะ<sup>(54)</sup> ศึกษาผลอัตราส่วนผสมระหว่างผงแก้วสปอดูมิน  $\text{Li}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$  (LAS) และคอร์เดียไรต์  $\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$  (MAS) ที่มีต่อความหนาแน่นและการเกิดเฟสหลังเผา โดยเตรียมผงแก้วสปอดูมินจากส่วนผสมของลิเทียมคาร์บอเนต อะลูมินา และซิลิกา แล้วนำไปหลอมที่ 1600 องศาเซลเซียส เตรียมผงแก้วคอร์เดียไรต์จากส่วนผสมของแมกนีเซียมออกไซด์ อะลูมินา และซิลิกา หลอมที่ 1500 องศาเซลเซียส นำผงแก้วสปอดูมินและคอร์เดียไรต์บดผสมกันในอัตราส่วนต่างๆ ตั้งแต่ 0-100 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แล้วนำชิ้นงานไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส นาน 4 ชั่วโมง พบว่าผงแก้วของสปอดูมิน 100 เปอร์เซ็นต์ และ คอร์เดียไรต์ 100 เปอร์เซ็นต์ มีการหดตัวสูง แต่เมื่อนำผงแก้วทั้ง 2 ชนิดมาผสมกันช่วยทำให้การหดตัวมีค่าลดลง โดยชิ้นงานยังมีความหนาแน่นสูงอยู่ และพบคอร์เดียไรต์และสปอดูมินไม่เกิดเฟสร่วมกัน

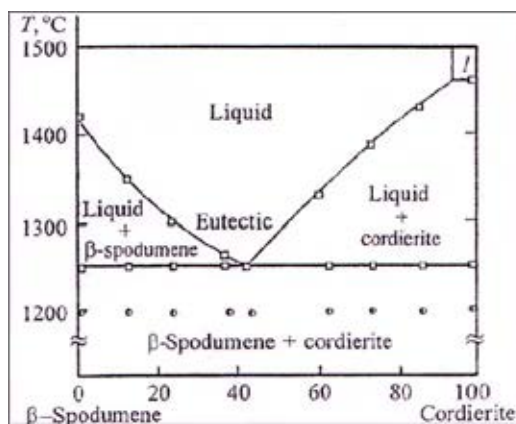
Karkhanavala, M. D. และ คณะ<sup>(55)</sup> ศึกษาข้อมูลทางเทอร์โมไดนามิกส์ เฟสไดอะแกรมพบว่าในระบบของคอร์เดียไรต์และสปอดูมินมีจุดยูเทคติกที่อุณหภูมิประมาณ 1347 องศาเซลเซียส ที่ช่วงอัตราส่วนของคอร์เดียไรต์ 40-50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและสปอดูมิน 50-60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยไม่เกิดเฟสอื่นร่วม ดังภาพที่ 2.16<sup>(55)</sup> จึงเป็นที่สนใจที่จะนำวัสดุสองชนิดนี้มาผสมกันเพื่อผลิตเป็นภาชนะเซรามิกสำหรับหุงต้มประเภทสัมผัสเปลวไฟโดยตรงที่มีความหนาแน่นสูง การดูดซึมน้ำต่ำ



ภาพที่ 2.16 เฟสไดอะแกรมของระบบ  $\text{Li}_2\text{O}-\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$

นอกจากนี้ยังพบข้อมูลการศึกษาส่วนผสมของบิตาสปอดูมิน-คอร์เดียไรต์โดย

Ordan'yan, S. S. และ คณะ ศึกษาโครงสร้างระบบของคอร์เดียไรต์-บิตาสปอดูมิน โดยการสังเคราะห์คอร์เดียไรต์จาก ดินขาว ทัลค์และอะลูมินา สังเคราะห์บิตาสปอดูมินจาก ลิเทียมคาร์บอเนต ควอตซ์และดินขาว นำบิตาสปอดูมินและคอร์เดียไรต์มาผสมในอัตราส่วนต่างๆ ตั้งแต่ 0 – 100 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่า ได้เฟสบิตาสปอดูมินและคอร์เดียไรต์เท่านั้นโดยไม่เกิดเฟสอื่นร่วม ดังภาพที่ 2.17<sup>(56)</sup> แต่ยังเป็นการวิจัยที่ใช้วัตถุดิบที่มีต้นทุนสูง โดยเฉพาะลิเทียมคาร์บอเนต



ภาพที่ 2.17 เฟสไดอะแกรมของระบบ คอร์เดียไรต์-บิตาสปอดูมิน

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะเตรียมส่วนผสม โดยการนำแร่สปอดูมินและคอร์เดียไรต์มาผสมกันในอัตราส่วนต่างๆ เพื่อศึกษาผลของส่วนผสม ที่มีต่อสมบัติต่างๆ โดยเฉพาะการสุกตัว และความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างเฉียบพลัน หลังเผาที่อุณหภูมิต่างๆ เพื่อใช้เป็นวัสดุเชิงประกอบสปอดูมิน/คอร์เดียไรต์ ในการผลิตภาชนะเซรามิกสำหรับหุงต้มประเภทสัมผัสเปลวไฟโดยตรง

### บทที่ 3

#### วิธีการดำเนินวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติหลังเผาและความต้านทานการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างเฉียบพลันของวัสดุเชิงประกอบสโปคูมิน/คอร์เดียไรต์ ในอัตราส่วนของสโปคูมิน ต่อ คอร์เดียไรต์ ตั้งแต่ 0:100 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1220 1250 1280 และ 1310 องศาเซลเซียส ซึ่งบทนี้ได้กล่าวถึง วัตถุประสงค์และสารเคมี วิธีการเตรียมตัวอย่าง การวัดสมบัติทางกายภาพ เชิงกลและทางความร้อน รวมทั้งการตรวจสอบองค์ประกอบทางเฟสและโครงสร้างจุลภาค ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็นหัวข้อต่างๆ ได้ดังนี้

#### 3.1 วัตถุประสงค์และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

##### 3.1.1 วัตถุประสงค์และสารเคมี

- แร่สโปคูมิน SC 7.5 ( $\text{Li}_2\text{O}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 4\text{SiO}_2$ ) บริษัท เซรามิก อาร์ อัส อินเตอร์ เนชั่นแนล เทคโนโลยี จำกัด นำเข้าจากประเทศออสเตรเลีย
- อะลูมินา A31 ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 99.6 %) บริษัท กลาสรัม จำกัด นำเข้าจากประเทศญี่ปุ่น
- ทัลค์ Special ( $3\text{MgO}\cdot 4\text{SiO}_3\cdot \text{H}_2\text{O}$ ) บริษัท เซอร์นิค อินเตอร์เนชั่นแนล จำกัด นำเข้าจากประเทศจีน
- ดินดำผง RAA บริษัท คอมพาวด์เคลย์ จำกัด จากประเทศไทย
- คาร์บอน (darvan 821 A) บริษัท คีรามอส จำกัด นำเข้าจากประเทศแคนาดา
- คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (CMC) บริษัท เซอร์นิค อินเตอร์เนชั่นแนล จำกัด นำเข้าจากประเทศจีน

##### 3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- แม่พิมพ์ปูนปลาสเตอร์
- เครื่องชั่งทศนิยม 2 และ 4 ตำแหน่ง
- เเวอร์เนียร์
- หม้ออบขนาด 20 กิโลกรัม ผงภายในกรุด้วยหินธรรมชาติ และ ลูกบดหิน
- หม้ออบอะลูมินา ขนาด 2 กิโลกรัม และลูกบดอะลูมินา
- ตะแกรงร่อน (sieve) ขนาด 100 และ 375 เมช และ ตะแกรงสเตนเลส
- ตู้อบและตู้ดูดความชื้น
- เตาเผาไฟฟ้า



### 3.2 ขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบและชิ้นงาน

#### 3.2.1 การเตรียมวัตถุดิบและผสมสารเคมีต่างๆ

- นำแร่สปอดูมินไปเผาแคลไซต์ที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 6 ชั่วโมง และ ยืนไฟที่อุณหภูมิสูงสุดเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นปล่อยให้เย็นตัวลงในเตา จะได้แร่สปอดูมินที่มี เฟสบีตา ( $\beta$ -spodumene) ตรวจสอบองค์ประกอบทางเฟสด้วยเครื่อง XRD กำหนดอัตราส่วนของ สปอดูมินกับคอร์เดียไรต์ ตั้งแต่ 0 ถึง 100 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนผสม (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ของวัสดุเชิงประกอบสปอดูมิน/คอร์เดียไรต์

สูตร (Formula)	สปอดูมิน (%)	เนื้อดินคอร์เดียไรต์ (%)
CS0	0	100
CS1	10	90
CS2	20	80
CS3	30	70
CS4	40	60
CS5	50	50
CS6	60	40
CS7	70	30
CS8	80	20
CS9	90	10
CS10	100	0

หมายเหตุ : S แทน สปอดูมิน และ C แทน คอร์เดียไรต์

- การเตรียมเนื้อดินคอร์เดียไรต์จากส่วนผสมของ ทัลค์ 40 % ดินคำผง 45 % และ อะลูมินา 15 % ซึ่งได้จากการนำค่าองค์ประกอบทางเคมีของ ทัลค์ ดินคำผง และอะลูมินา ดังตารางที่ 3.2 คำนวณ แล้วค่าที่คำนวณได้เทียบกับสูตรทางเคมีของคอร์เดียไรต์ทางทฤษฎีที่  $MgO$  13.8 %,  $Al_2O_3$  34.9 % และ  $SiO_2$  51.4 % ซึ่งวัตถุดิบโดยมีส่วนผสมของ ทัลค์ 8 กิโลกรัม ดินคำผง 9 กิโลกรัม และ อะลูมินา 3 กิโลกรัม รวมวัตถุดิบทั้งหมด 20 กิโลกรัม เติมน้ำในปริมาณ 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แห่ง และ เติมคาร์บอนเพื่อเป็นสารช่วยกระจายลอยตัว 0.35 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห่ง บดผสม ให้เข้ากันในหม้อบดปอร์ซเลนดังภาพที่ 3.1 เป็นเวลานาน 8 ชั่วโมง นำน้ำดินที่ได้มากรองในอ่าง ปูนพลาสติกพอเนื้อดินหมาดแล้วอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 3.2 องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบตั้งต้น

องค์ประกอบ (%)	แร่สปอคูมิน (SC 7.5)	ทัลค์ (special)	ดินดำผง (RAA)	อะลูมินา (A31)
Li <sub>2</sub> O	7.60	-	-	-
MgO	-	32.3	0.10	-
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.07	0.1	1.20	0.02
MnO	0.02	-	0.03	-
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	26.5	0.6	31.3	99.6
SiO <sub>2</sub>	64.5	62.7	49.8	0.02
Na <sub>2</sub> O	0.15	0.5	0.5	0.30
K <sub>2</sub> O	0.08	0.1	1.6	-
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.17	-	-	-
CaO	0.05	1.9	0.4	-
TiO <sub>2</sub>	0.01	-	0.7	-
L.O.I.	0.20	1.6	13.7	0.1

- ซึ่งส่วนผสมระหว่างบิตาสปอคูมินกับคอร์เดียไรต์ตามอัตราส่วนของสปอคูมินต่อคอร์เดียไรต์ ตั้งแต่ 0:100 จนถึง 100:0 เปรอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เติมสารช่วยกระจายลอยตัวโซเดียมซิลิเกตผสมกับคาร์บอน ในอัตราส่วน 0.35 เปรอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห่งของวัตถุดิบ ผสมโดยใช้น้ำ 50 กรัม ซึ่งโซเดียมซิลิเกตและคาร์บอน ดังตารางที่ 3.3 เขย่าจนโซเดียมซิลิเกตและคาร์บอนละลายเข้าด้วยกัน จากนั้นบดผสมแบบเปียกโดยใช้น้ำตั้งแต่ 33.3-43.3 เปรอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห่งของวัตถุดิบ ผสมลงในหม้อบดอะลูมินา ภายในบรรจุลูกบดอะลูมินา ดังภาพที่ 3.2 บดนาน 24 ชั่วโมง เติมตัวช่วยประสาน คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (CMC) ลงในสูตร CS4 - CS10 ในอัตราส่วน 1 เปรอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักแห่งของบิตาสปอคูมิน (ผสมเป็นสารละลาย 5 เปรอร์เซ็นต์) ดังตารางที่ 3.3 บดผสมต่อเนื่องประมาณ 8 ชั่วโมง กรองน้ำคินผ่านตะแกรงร่อน 100 เมช วัดค่าความหนืดของน้ำคินด้วยเครื่อง Torsion viscometer (รุ่น N569 จากบริษัท Gabtec ผลิตจากประเทศอิตาลี) ดังภาพที่ 3.3 วัดค่าความถ่วงจำเพาะ ดังภาพที่ 3.4 วัดการกระจายตัวของขนาดอนุภาคด้วยเครื่อง Particle Size Distribution Analyzer PSD และหาปริมาณกากค้างตะแกรงโดยใช้ตะแกรงร่อนเบอร์ 325 เมช

ตารางที่ 3.3 ส่วนผสมของเนื้อดินสโปคูมิน/คอร์เดียไรต์ในอัตราส่วนต่างๆ

สูตร (C:S)	สโปคูมิน (กรัม)	คอร์เดียไรต์ (กรัม)	ดาร์วัน (กรัม)	โซเดียมซิลิเกต (กรัม)	คาร์บอกซีเมทิล เซลลูโลส (มิลลิลิตร)
CS0 (0:100)	-	2000	3.85	3.15	-
CS1 (10:90)	200	1800	4.17	2.84	-
CS2 (20:80)	400	1600	4.48	2.52	-
CS3 (30:70)	600	1400	4.80	2.21	-
CS4 (40:60)	800	1200	5.11	1.89	50
CS5 (50:50)	1000	1000	5.43	1.58	75
CS6 (60:40)	1200	800	5.74	1.26	100
CS7 (70:30)	1400	600	6.06	0.95	120
CS8 (80:20)	1600	400	6.37	0.63	140
CS9 (90:10)	1800	200	6.69	0.32	160
CS10 (0:100)	2000	-	7.00	7.0	180

หมายเหตุ : S แทน สโปคูมิน และ C แทน คอร์เดียไรต์



ภาพที่ 3.1 หม้อบดขนาด 20 กิโลกรัม

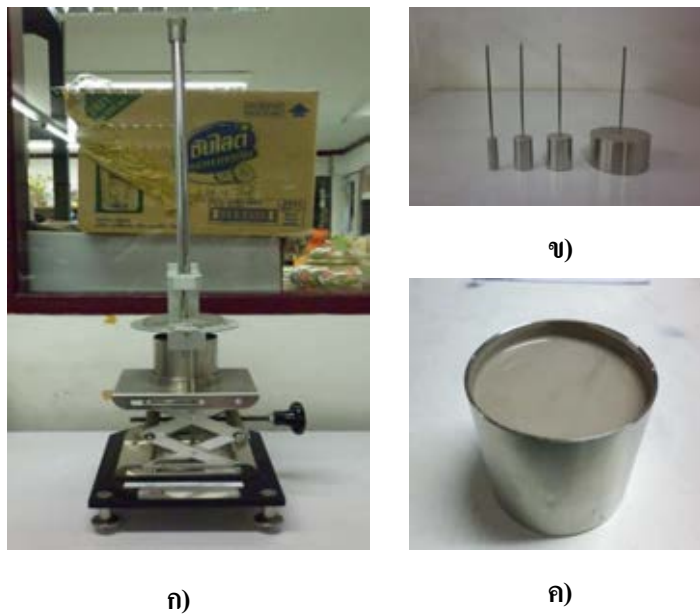


ก)

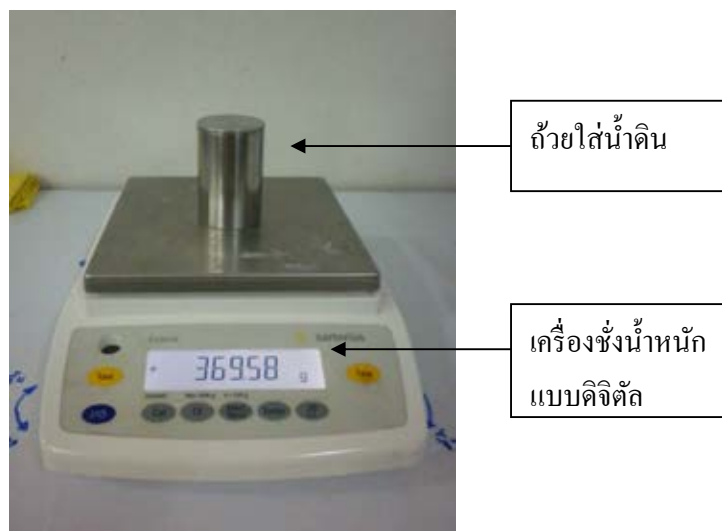


ข)

ภาพที่ 3.2 ก) หม้อบดอะลูมินา และ ข) ลูกบดอะลูมินา



ภาพที่ 3.3 ก) เครื่องวัดความชื้นของน้ำดิน ข) หัวเข็มสำหรับวัดความชื้นของน้ำดิน และ ค) ถ้วยรองรับน้ำดินเพื่อใช้วัดความชื้น



ภาพที่ 3.4 การวัดความถ่วงจำเพาะของน้ำดิน

### 3.2.2 การขึ้นรูปชิ้นงาน

1. ปรับนำดินที่เตรียมได้ในแต่ละสูตรให้มีค่าการไหลตัวที่คืออยู่ในช่วง 500-1000 เซนติพอยซ์ และค่าความถ่วงจำเพาะอยู่ในช่วง 1.65-1.73
2. ขึ้นรูปชิ้นงานด้วยวิธีการหล่อแบบโดยใช้แบบพิมพ์ปูนปลาสเตอร์ แล้วเทน้ำดินลงในแบบพิมพ์จนเต็มทิ้งไว้ 30-60 นาที ดังภาพที่ 3.5 ก) และ ข)
3. แกะแบบพิมพ์ปูนปลาสเตอร์ออก จะได้ชิ้นงานเป็นแท่งทรงกระบอกตัน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 มิลลิเมตร หนาความยาว 15 เซนติเมตร จัดเส้นกลางชิ้นงาน ด้วยไม้บรรทัดหรืออุปกรณ์ที่ตัดเตรียมไว้ยาว 10 เซนติเมตร ดังภาพที่ 3.5 ค) และ ง)
4. ตกแต่งชิ้นงานด้วยฟองน้ำ ทิ้งให้แห้งประมาณ 1-2 วัน นำไปอบให้แห้งในเตาอบที่ 110 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง



ก)



ข)



ค)



ง)

ภาพที่ 3.5 ก) แบบพิมพ์ปูนปลาสเตอร์ ข) การเทน้ำดินลงในแบบพิมพ์ ค) แกะแบบพิมพ์ปูนปลาสเตอร์ และ ง) ชิ้นงานเป็นแท่งทรงกระบอกตัน

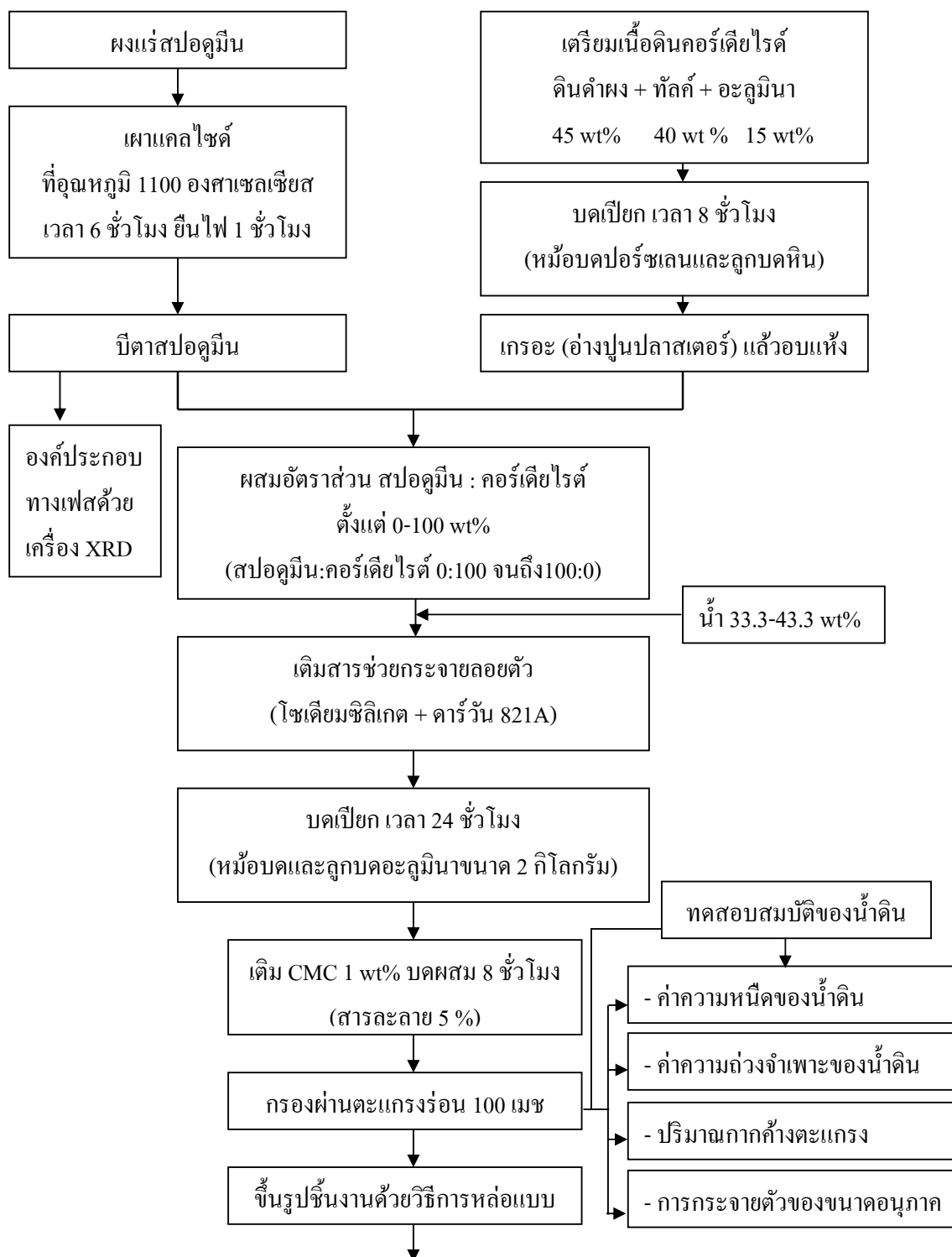
### 3.2.3 การเผาผลาญ

นำชิ้นงานที่ได้จากการหล่อแบบเผาที่อุณหภูมิต่างๆ ดังนี้ คือ 1220 1250 1280 1310 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการเผาที่อุณหภูมิ 3 องศาเซลเซียสต่อนาที ขึ้นไฟที่อุณหภูมิสูงสุดเป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยใช้เตาไฟฟ้า (รุ่น N 300/14, ผลิตจากบริษัท Nabertherm ประเทศเยอรมัน) ดังภาพที่ 3.6 และนำตัวอย่างที่ได้ไปวิเคราะห์สมบัติต่างๆ



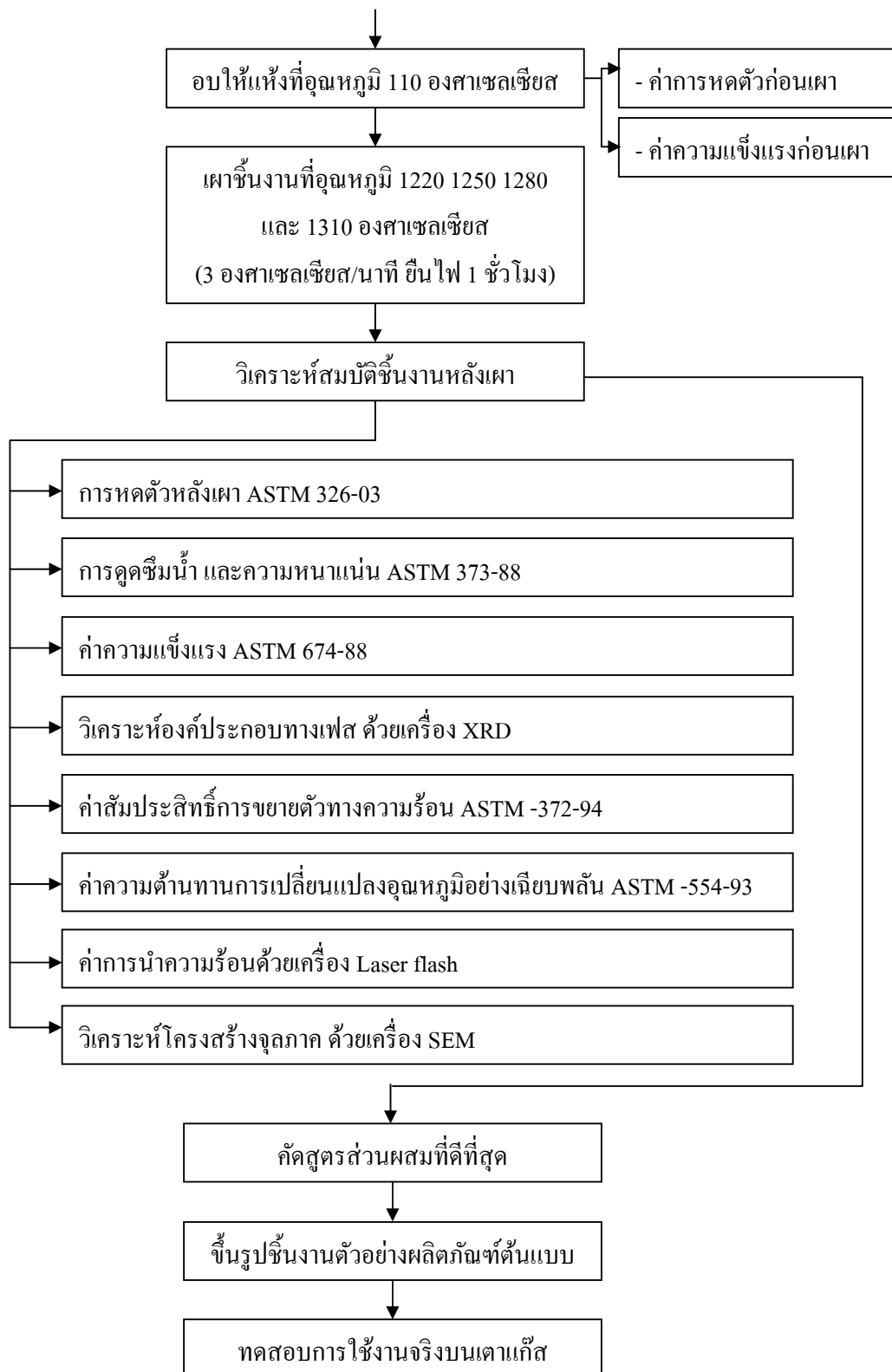
ภาพที่ 3.6 เตาเผา Nabertherm

### 3.3 แผนผังการทดลอง



ภาพที่ 3.7 แผนผังการดำเนินงาน





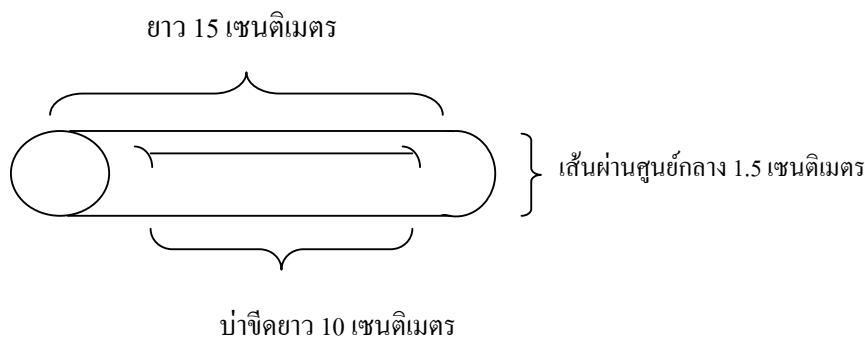
ภาพท้ 3.7 (ต่อ) แผนผ้ังการด้ำเนนงาน

### 3.4 การวิเคราะห์สมบัติต่างๆ ของชิ้นงาน

#### 3.4.1 การหดตัวของชิ้นงานก่อนเผาและหลังเผา

ศึกษาการหดตัวของชิ้นงานก่อนเผาและหลังเผา โดยนำชิ้นงานสปอคูมิน/คอร์ดเคียวไรต์ ที่เตรียมได้จาก สปอคูมิน ทัลค์ ดินคำผง และอะลูมินา ในอัตราส่วนต่างๆ ดังตารางที่ 3.3 ขึ้นรูปด้วยวิธีการหล่อแบบ หากการหดตัวก่อนเผาหลังอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส และหลังเผาที่อุณหภูมิ 1220 1250 1280 และ 1310 องศาเซลเซียส ตามวิธีมาตรฐาน ASTM 326-03<sup>(57)</sup> โดยมีวิธีการดังนี้ คือ

1. ชีดเส้นลงบนชิ้นงานทันทีด้วยมีดปลายแหลมให้มีความยาว 10 เซนติเมตร หลังจากแกะออกจากแบบพิมพ์ปูนปลาสเตอร์ ดังภาพที่ 3.8 กำหนดให้เป็นค่าความยาวของชิ้นงานเริ่มต้น ( $L_{\text{เริ่มต้น}}$ )



ภาพที่ 3.8 การขีดเส้นลงบนชิ้นงานเพื่อวัดการหดตัว

2. อบชิ้นงานที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 24 ชั่วโมง วัดความยาวของเส้นที่ขีดไว้บนชิ้นงานด้วยเวอร์เนีย กำหนดให้เป็นค่าความยาวของชิ้นงานก่อนเผา ( $L_{\text{ก่อนเผา}}$ )

3. เผาชิ้นงานที่อุณหภูมิ 1220 1250 1280 และ 1310 องศาเซลเซียส วัดความยาวของเส้นที่ขีดไว้บนชิ้นงานด้วยเวอร์เนีย กำหนดให้เป็นค่าความยาวของชิ้นงานหลังเผา ( $L_{\text{หลังเผา}}$ )

4. นำค่าที่ได้จาก ข้อ 2 3 และ 4 คำนวณค่าการหดตัวก่อนเผาและหลังเผา โดยการแทนค่าลงในสมการ (1)

$$\% \text{ Shrinkage} = \frac{L_{\text{เริ่มต้น}} - L_{\text{ก่อนเผาหรือหลังเผา}}}{L_{\text{เริ่มต้น}}} \times 100 \quad \text{สมการ (1)}$$

เมื่อ  $L_{\text{เริ่มต้น}}$  คือ ความยาวของชิ้นงานเริ่มต้น (10 เซนติเมตร)  
 $L_{\text{ก่อนเผาหรือหลังเผา}}$  คือ ความยาวของชิ้นงานก่อนเผาหรือหลังเผา

### 3.4.2 ความหนาแน่นและการดูดซึมน้ำ

ศึกษาความหนาแน่นและการดูดซึมน้ำของชิ้นงานหลังเผา ที่อุณหภูมิ 1220 1250 1280 และ 1310 องศาเซลเซียส โดยใช้วิธีแทนที่น้ำ (Archimedes Method) ตามวิธีมาตรฐาน ASTM C373 – 88 (2006) <sup>(58)</sup> มีวิธีการดังนี้ คือ

1. นำชิ้นงานหลังเผาอบแห้ง แล้วนำไปชั่งน้ำหนักแห้ง ( $W_{dry}$ )
2. นำชิ้นงานไปต้มจนในน้ำเดือดเป็นเวลานาน 5 ชั่วโมง หลังจากนั้นแช่ไว้ในน้ำอีก 24 ชั่วโมง
3. นำชิ้นงานมาชั่งน้ำหนักในน้ำ ( $W_{sus}$ ) ใช้ผ้าซับน้ำที่ผิวชิ้นงานออก นำไปชั่งน้ำหนัก ( $W_{sat}$ )
4. คำนวณค่าความหนาแน่นและการดูดซึมน้ำ โดยการแทนค่าลงในสมการ(2) และ (3)

$$\text{Bulk Density} = \frac{W_{dry}}{W_{sat} - W_{sus}} \quad \text{สมการ (2)}$$

$$\% \text{ Water absorption} = \frac{W_{sat} - W_{dry}}{W_{dry}} \quad \text{สมการ (3)}$$

โดยที่ Bulk Density = ความหนาแน่นของชิ้นงาน (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)

% Water absorption = เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ

$W_{dry}$  = น้ำหนักของชิ้นงานแห้งในอากาศ (กรัม)

$W_{sat}$  = น้ำหนักของชิ้นงานที่อิ่มตัวด้วยน้ำและซับน้ำที่ผิวออกไป (กรัม)

$W_{sus}$  = น้ำหนักของชิ้นงานเมื่อชั่งแบบแขวนในน้ำ (กรัม)

### 3.4.3 ความแข็งแรง (MOR)

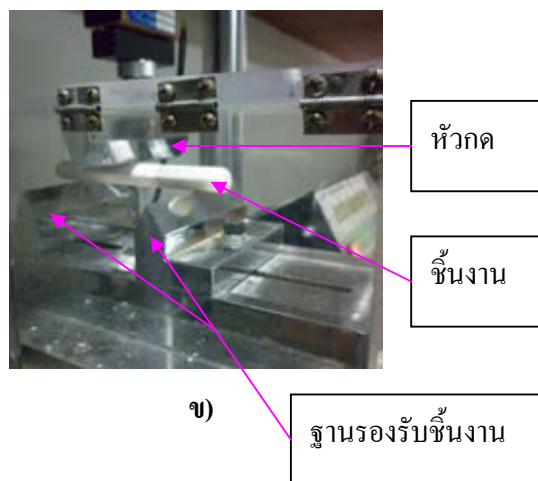
ศึกษาความแข็งแรงของชิ้นงาน เมื่อมีแรงมากระทำ โดยใช้วิธี three-point bending โดยการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยวิธีการหล่อแบบในแม่พิมพ์ปูนพลาสติก เป็นแท่งทรงกระบอกตัน มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 15 มิลลิเมตร และมีความยาวประมาณ 150 มิลลิเมตร ดังภาพที่ 3.8 จากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิ 1220 1250 1280 และ 1310 องศาเซลเซียส นำมาทดสอบความแข็งแรงด้วยเครื่อง MOR (รุ่น HT8116 ผลิตโดยบริษัท Hung Ta) ตามวิธีมาตรฐาน ASTM C674 – 88 (2006)<sup>(59)</sup> ดังภาพที่ 3.9 และนำค่าที่วัดได้แทนค่าลงในสมการ (4)

$$\text{Modulus of Rupture} = \frac{8PL}{\pi d^2} \quad \text{สมการ (4)}$$

เมื่อ	P	=	แรงกดจนชิ้นงานหัก (นิวตัน)
	L	=	ระยะระหว่างฐานรองรับชิ้นงาน (มิลลิเมตร)
	d	=	เส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงาน (มิลลิเมตร)



ก)



ข)

ภาพที่ 3.9 ก) เครื่องหาค่าความแข็งแรง (MOR) และข) การทดสอบความแข็งแรงของชิ้นงาน

### 3.4.4 องค์ประกอบทางเฟส

ศึกษาองค์ประกอบทางเฟสของผงวัตถุดิบ คือ สบอคูมินก่อนเผาและหลังเผาที่ 1100 องศาเซลเซียส ทลค์ ดินคำผง และอะลูมินา และองค์ประกอบทางเฟสของชิ้นงานหลังเผาที่อุณหภูมิ 1250 1280 และ 1310 องศาเซลเซียส บดชิ้นงานหลังเผาให้ละเอียด ผ่านตะแกรงร่อนเบอร์ 200 เมช จำนวนประมาณ 2 กรัม จากนั้นนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟส ด้วยเครื่อง X-ray diffractometer (รุ่น D8-Advance ผลิตโดยบริษัท Bruker) ใช้  $\text{Cu} - \text{K}\alpha$  radiation ที่ scanning speed 2.4 องศาต่อนาที ในช่วงมุม  $2\theta$  ตั้งแต่ 10 ถึง 80 องศา ดังภาพที่ 3.10



ภาพที่ 3.10 เครื่อง X-Ray Diffractometer

### 3.4.5 การวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน

ศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของชิ้นงานสไปดคูมิน/คอร์เคียไรต์ ที่เตรียมได้จาก สไปดคูมิน ทัลค์ ดินคำผง และอะลูมินา แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 1220 1250 1280 และ 1310 องศาเซลเซียส จากนั้นเตรียมตัวอย่างโดยนำชิ้นงาน ตัดให้ได้ขนาด ความยาว 4 เซนติเมตร กว้าง 0.5 เซนติเมตร นำไปหาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนด้วยเครื่อง Dilatometer (รุ่น 1161 ผลิตโดยบริษัท Anter-Corporation) ตามวิธีมาตรฐาน ASTM 372-94<sup>(60)</sup> ดังภาพที่ 3.11



ภาพที่ 3.11 เครื่อง Dilatometer (1161, Anter Unitherm, Italy)

### 3.4.6 การกระจายตัวของขนาดอนุภาค

ศึกษาการกระจายตัวและขนาดของอนุภาคผงวัตถุคิบ คือ สปอคูมิน ทัลค์ ดินคำผง และอะลูมินา และสูตรเนื้อดินสปอคูมิน/คอร์เดียไรต์ ที่เตรียมจากวัตถุคิบดังกล่าวข้างต้น ที่ผ่านการบดส่วนผสมแล้ว เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำน้ำดินที่เตรียมได้ประมาณ 20 มิลลิลิตร วิเคราะห์หาการกระจายตัวและขนาดของอนุภาค โดยใช้เทคนิค Laser scattering ด้วยเครื่อง Particle Size Distribution Analyzer PSD (รุ่น LS100 ผลิตจากบริษัท Beckman Coulter) ดังภาพที่ 3.12



ภาพที่ 3.12 เครื่อง Particle Size Distribution Analyzer PSD

### 3.4.7 โครงสร้างจุลภาค

ศึกษาโครงสร้างจุลภาค ของผงวัตถุคือ สปอคูมิน ทัลค์ ดินคำผง และอะลูมินา และ ชิ้นงานสปอคูมิน/คอร์เดียไรต์ หลังเผาที่อุณหภูมิ 1280 องศาเซลเซียส ด้วยการเตรียมตัวอย่างผง วัตถุและชิ้นงานหลังเผาดังนี้

1. สำหรับวัตถุดิบเตรียมตัวอย่างโดย นำผงวัตถุดิบ โรยบนแผ่นคาร์บอนที่ติดกับก้านวาง ตัวอย่างและฉาบผิวของตัวอย่างด้วยทอง

2. นำชิ้นงานหลังเผา มาตัดให้มีขนาดหนา 1 เซนติเมตร จากนั้นนำมาขัดหยาบด้วยกระดาษทรายตั้งแต่เบอร์หยาบจนถึงเบอร์ละเอียดดังนี้ 240 600 1000 1200 2400 แล้วขัดละเอียดด้วยผงเพชรขนาด 6 และ 3 ไมครอนบนผ้ากำมะหยี่ ตามลำดับ

3. นำชิ้นงานในข้อ 2. กัดกรดโดยใช้กรดไฮโดรฟลูออริก (Hydrofluoric acid) เข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร นำชิ้นงานแช่ลงในกรดนาน 20 วินาที ล้างน้ำให้สะอาด แล้วอบให้แห้ง

4. นำชิ้นงานในข้อ 3 ติดเข้ากับก้านวางตัวอย่างด้วยเทปกาวคาร์บอน และฉาบผิวของ ตัวอย่างด้วยทอง

5. ตรวจสอบรูปร่างของผลึกและรูพรุนที่เกิดขึ้นหลังเผา และตรวจสอบเฟส ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) รุ่น JSM - 6480LV ผลิตโดยบริษัท JEOL ดังภาพที่ 3.13



ภาพที่ 3.13 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)



### 3.4.8 การทดสอบความต้านทานการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างเฉียบพลัน

หลังจากได้ศึกษาสมบัติการหดตัว การดูดซึมน้ำ ความแข็งแรง และค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน คัดเลือกสูตรเนื้อดินสปอคูมิน/คอร์เดียไรต์ ที่มีค่าการดูดซึมน้ำและค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ ทดสอบความต้านทานการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างเฉียบพลัน ตามวิธีมาตรฐาน ASTM 554-93 (2006) <sup>(61)</sup> มีวิธีดังนี้ คือ

1. นำชิ้นงานที่ต้องการทดสอบจำนวน 5 - 10 ชิ้น ใส่งในภาชนะที่สามารถทนไฟได้ ควรจะเป็นสแตนเลส ดังภาพที่ 3.14 ก)

2. อุ่นเตาให้ร้อนถึงอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส แล้วนำชิ้นงานที่เตรียมไว้ในข้อ 1. ใส่งเตาทิ้งไว้ 45 นาที ดังภาพที่ 3.14 ข)

3. คีบชิ้นงานออกมาอย่างรวดเร็วใส่งในน้ำทันที (น้ำต้องรักษาอุณหภูมิไว้ที่ 20 องศาเซลเซียส หรือ อุณหภูมิห้อง) แช่ชิ้นงานทิ้งไว้ประมาณ 5-10 นาที ดังภาพที่ 3.14 ค)

4. จุ่มชิ้นงานลงใน เมทิลดีนบลู ประมาณ 5 นาที ดังภาพที่ 3.14 ง) ตรวจสอบการร้าวและความแตกร้าว ถ้าไม่ปรากฏความเสียหายนำเข้าเตาเผาที่อุณหภูมิเดิม โดยทำซ้ำจำนวน 5 ครั้ง

5. หลังจากทำซ้ำจำนวน 5 ครั้ง ถ้าชิ้นงานไม่ปรากฏความเสียหาย ให้เพิ่มอุณหภูมิขึ้นอีก 50 องศาเซลเซียส (เช่น 250 องศาเซลเซียส) ทำซ้ำตั้งแต่ ข้อ 2-4 ถ้าชิ้นงานไม่ปรากฏความเสียหาย ให้เพิ่มอุณหภูมิขึ้นไปเรื่อยๆ จนกว่าจะพบความเสียหายเกิดขึ้นที่ชิ้นงาน



ก)



ข)



ค)



ง)

ภาพที่ 3.14 ก) วางชิ้นทดสอบลงบนภาชนะสแตนเลส ข) นำชิ้นงานใส่งเตาอบ  
ค) คีบชิ้นงานออกจากเตา และ ง) จุ่มชิ้นงานลงในเมทิลดีนบลู

### 3.4.9 การนำความร้อน

หลังจากคัดเลือกสูตรเนื้อดินสโปคูมิน/คอร์เดียไรต์ ที่ผ่านการทดสอบความต้านทานการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างเฉียบพลันแล้ว นำชิ้นงานหลังเผาของสูตรเนื้อดินที่คัดเลือกมาตัดและขัดให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร และหนาไม่เกิน 1-1.5 มิลลิเมตร แล้วนำไปทดสอบหาค่าการนำความร้อน ด้วยเครื่อง Laser Flash (รุ่น TC7000 ผลิตจากบริษัท Ulvac-Riko)

### 3.4.10 ทดสอบการใช้งานจริงบนเตาแก๊สของชิ้นงานตัวอย่างหลังเผา

คัดเลือกสูตรเนื้อดินที่เหมาะสม จากนั้นขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์หม้อต้มอาหาร แล้วนำสูตรเคลือบที่สามารถเคลือบบนเนื้อดินสโปคูมิน/คอร์เดียไรต์ โดยเคลือบไม่เกิดการร้าวตัว ผิวเคลือบถึงมันถึงด้านหรือมีนวล เคลือบบนชิ้นงานตัวอย่างหม้อต้มอาหาร เเผาที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส นำมาทดสอบการใช้งานจริงบนเตาแก๊สโดยใส่น้ำประมาณ ½ ของหม้อ ดังภาพที่ 5.14 ก) ตั้งบนเตาแก๊ส ต้มน้ำให้น้ำเดือด ดังภาพที่ 5.14 ข) จากนั้นจับเวลา 10 นาที หลังน้ำเดือด แล้วนำชิ้นงานตัวอย่างจุ่มลงในน้ำทันที ดังภาพที่ 5.14 ค) ตรวจสอบรอยร้าวด้วยเมทิลลินบลู ดังภาพที่ 5.14 ง) ถ้าไม่พบการร้าว ทำซ้ำจำนวน 10 ครั้ง



ก)



ข)



ค)



ง)

ภาพที่ 3.15 ก) ใส่น้ำครึ่งหนึ่งลงในชิ้นงานตัวอย่าง ข) ต้มน้ำเดือดบนเตาแก๊ส ค) จุ่มชิ้นงานตัวอย่างลงในน้ำทันที และ ง) ตรวจสอบรอยร้าวด้วยเมทิลลินบลู

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและอภิปราย

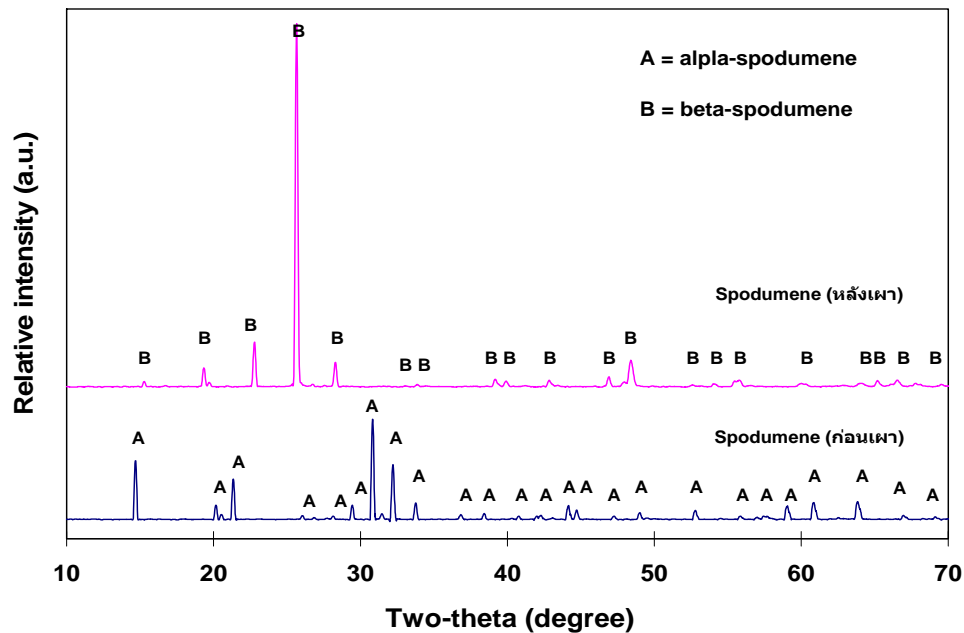
ผลการทดลองการเตรียมเนื้อดินสปอดูมิน/คอร์เดียไรต์ ให้มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ สามารถทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างเฉียบพลันได้ เพื่อนำไปผลิตเป็นภาชนะเซรามิกหุงต้ม ซึ่งบทนี้จะกล่าวถึง ลักษณะเฉพาะของผงวัตดูดิบ การกระจายตัวขนาดอนุภาค หลังจากการบด ผลการทดสอบสมบัติต่างๆ ของชิ้นงานหลังเผา เช่น การหดตัว การดูดซึมน้ำและความหนาแน่น ความแข็งแรง เป็นต้น ผลของการทดลองขึ้นรูปชิ้นงานตัวอย่าง มีดังนี้

#### 4.1 ลักษณะเฉพาะของผงวัตดูดิบ

##### 4.1.1 แร่สปอดูมินก่อนเผาและหลังเผา

องค์ประกอบทางเฟสของ แร่สปอดูมินก่อนเผาแคลไซต์ พบเฟสแอลฟาสปอดูมิน (alpha-spodumene) เพียงเฟสเดียว ส่วนแร่สปอดูมินหลังเผาแคลไซต์ที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส พบเฟสบีตาสปอดูมิน (beta-spodumene) เพียงเฟสเดียว เนื่องจากเมื่อเผาแคลไซต์แร่สปอดูมินที่อุณหภูมิมากกว่า 1080 องศาเซลเซียส จะเกิดการเปลี่ยนแปลงเฟสของสปอดูมินจากแอลฟาไปเป็นบีตา ดังภาพที่ 4.1

ตรวจสอบการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของแร่สปอดูมินก่อนเผาและหลังเผา พบว่า มีช่วงการกระจายตัวของขนาดอนุภาคสะสมร้อยละ 50 ( $d_{50}$ ) ที่ลดลง คือ แอลฟาสปอดูมิน มีช่วงการกระจายตัวของขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 0.58-262.30 ไมครอน ( $\mu\text{m}$ )  $d_{50}$  มีค่าเท่ากับ 104.8 ไมครอน ส่วนบีตาสปอดูมินมีช่วงการกระจายตัวของขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 0.42-291.90 ไมครอน  $d_{50}$  มีค่าเท่ากับ 68.35 ไมครอน จากกราฟการกระจายตัวของขนาดอนุภาค ดังภาพที่ 4.2 ก.) บีตาสปอดูมินมีลักษณะการกระจายตัวของขนาดอนุภาคอยู่ในช่วงกว้างกว่าแอลฟาสปอดูมิน และ  $d_{50}$  ขนาดอนุภาคหลังเผามีขนาดเล็กลง อาจเนื่องจากการเผาจะทำให้แก๊สบางชนิดระเหยออกไป และจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า ค่าความถ่วงจำเพาะหลังเผาจะมีค่าที่ลดลงจาก 3.2 ไปเป็น 2.4



ภาพที่ 4.1 องค์ประกอบทางเฟสของแร่สปอดูมินก่อนเผาและหลังเผา

#### 4.1.1 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของวัตถุดิบ

การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของวัตถุดิบตั้งต้น คือ บิตาสปอดูมิน ทัลค์ ดินคำผง และ อะลูมินา ดังภาพที่ 4.3 มีดังนี้

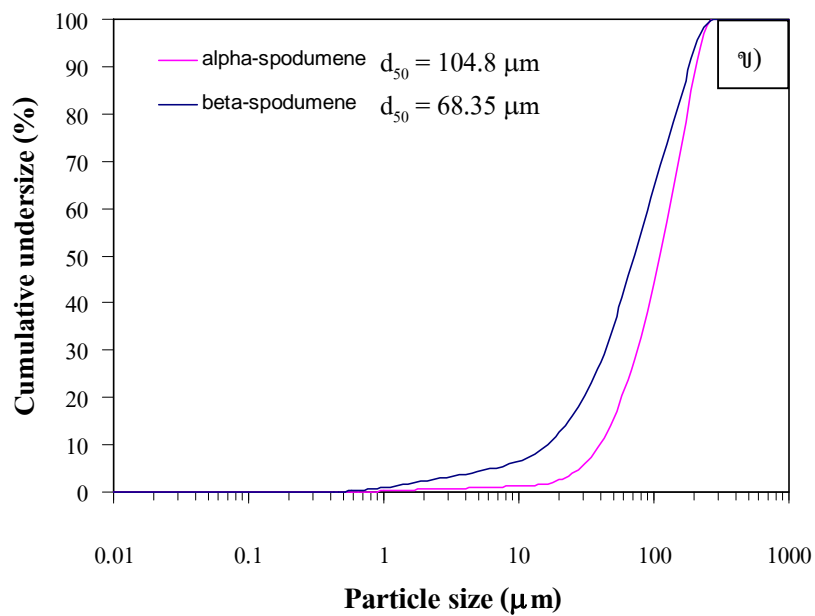
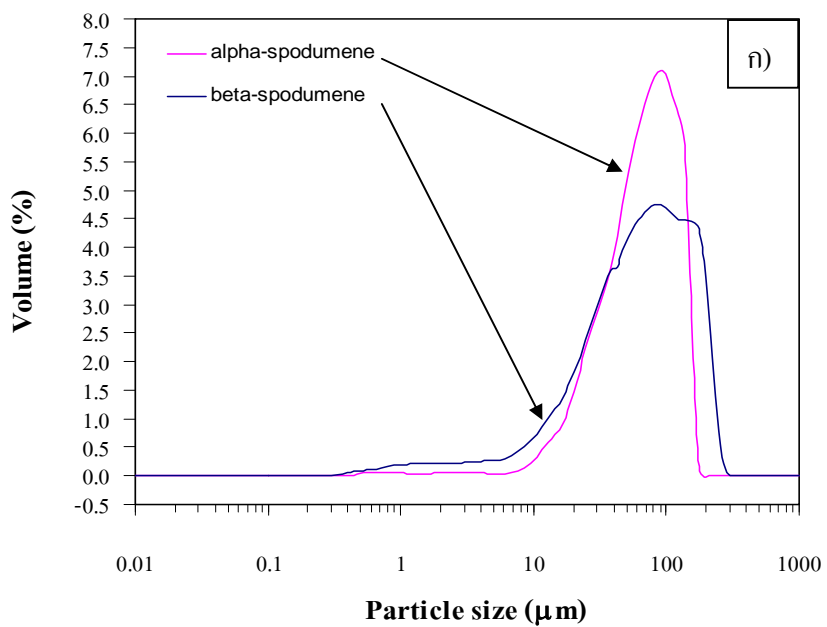
บิตาสปอดูมินมีช่วงการกระจายตัวของขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 0.42-291.90 ไมครอน  $d_{50}$  มีค่าเท่ากับ 68.35 ไมครอน

ทัลค์ มีช่วงการกระจายตัวของขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 0.42-89.79 ไมครอน  $d_{50}$  มีค่าเท่ากับ 12.18 ไมครอน และมีลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคในช่วงกว้าง

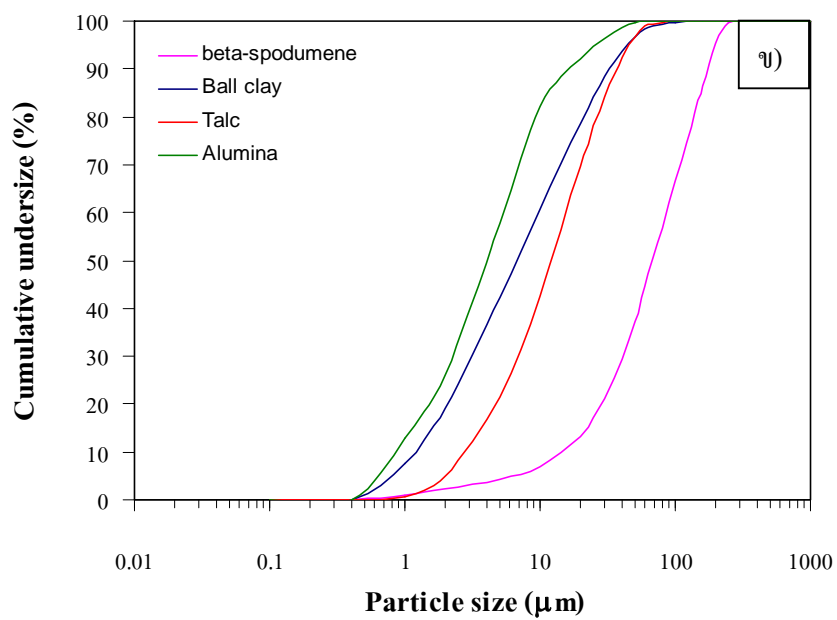
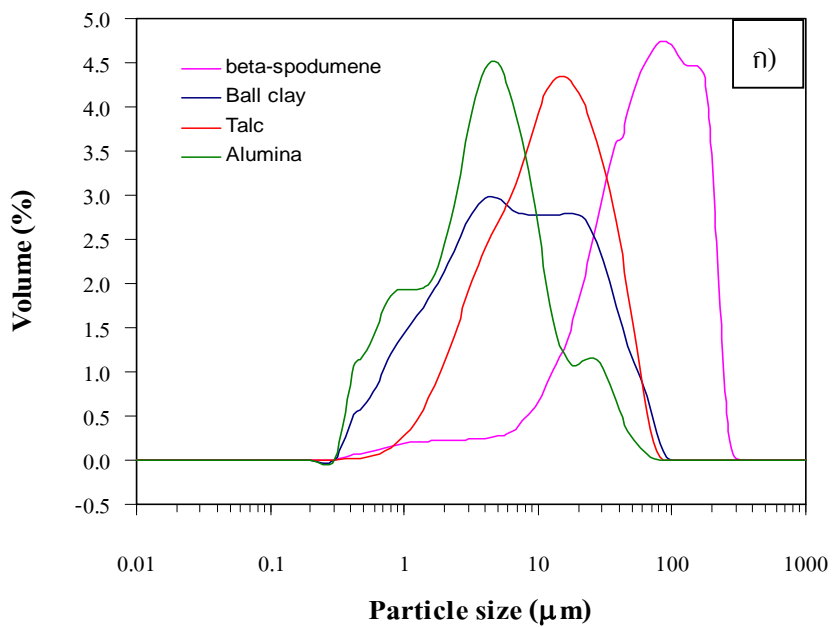
ดินคำผง มีช่วงการกระจายตัวของขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 0.42-99.92 ไมครอน  $d_{50}$  มีค่าเท่ากับ 6.67 ไมครอน และมีลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคในช่วงกว้าง

อะลูมินา (A31) มีช่วงการกระจายตัวของขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 0.42-80.66 ไมครอน  $d_{50}$  มีค่าเท่ากับ 4.14 ไมครอน และมีลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคในช่วงกว้าง

บิตาสปอดูมินมีขนาดอนุภาคใหญ่ที่สุด รองลงมาคือ ทัลค์ ดินคำผง และอะลูมินาที่มีขนาดอนุภาคที่เล็กกว่า 5 ไมครอน ตามลำดับ



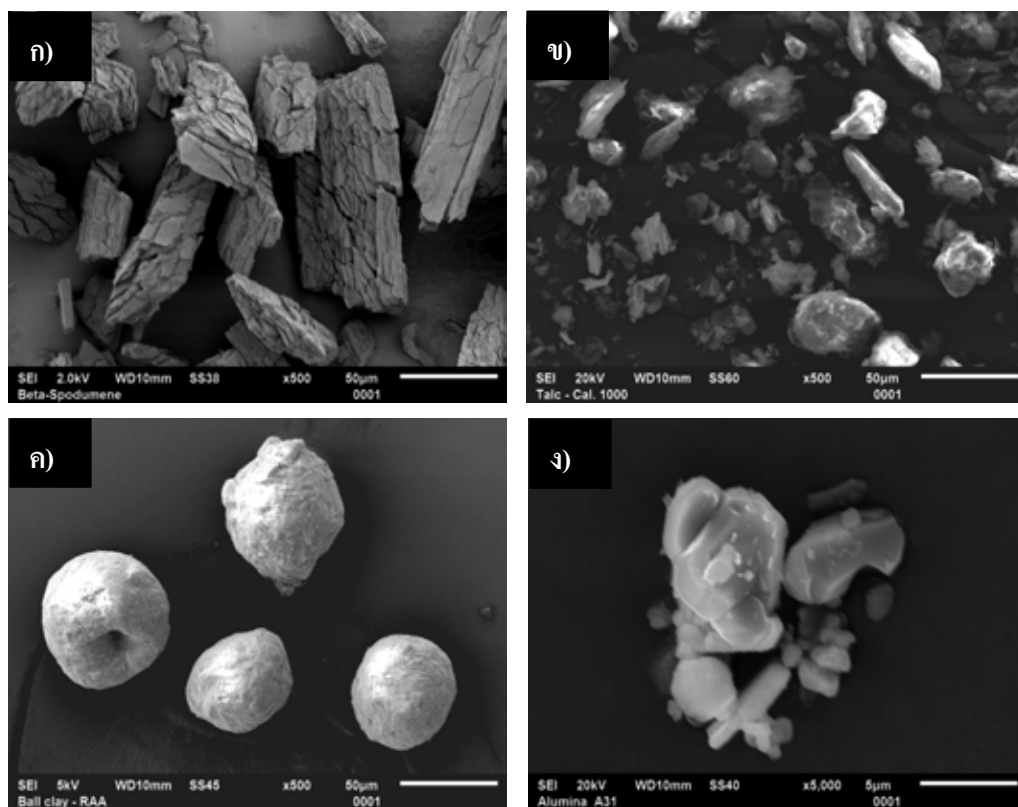
ภาพที่ 4.2 ก) การกระจายตัวขนาดอนุภาคของสปอดูมินก่อนเผาและหลังเผา และ  
ข) การกระจายตัวสะสมของอนุภาค



ภาพที่ 4.3 ก) การกระจายตัวขนาดอนุภาคของผงวัตุดิบ และ ข) การกระจายตัวสะสมของอนุภาค

#### 4.1.2 ลักษณะทางจุลภาค

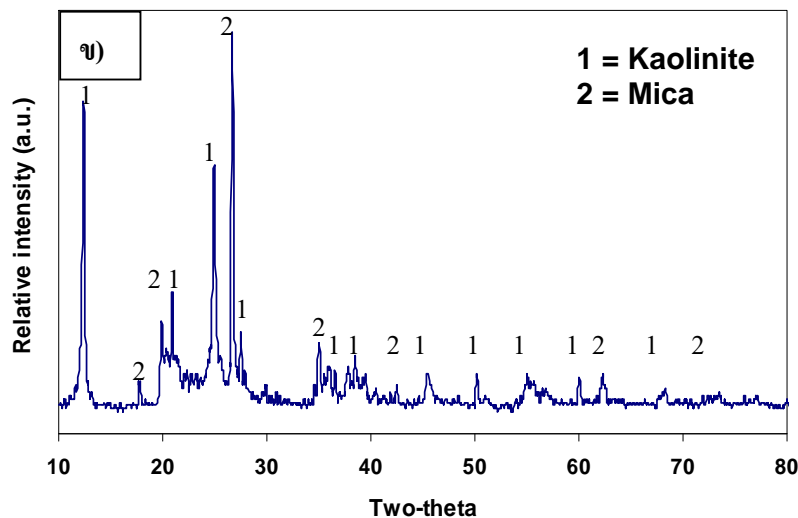
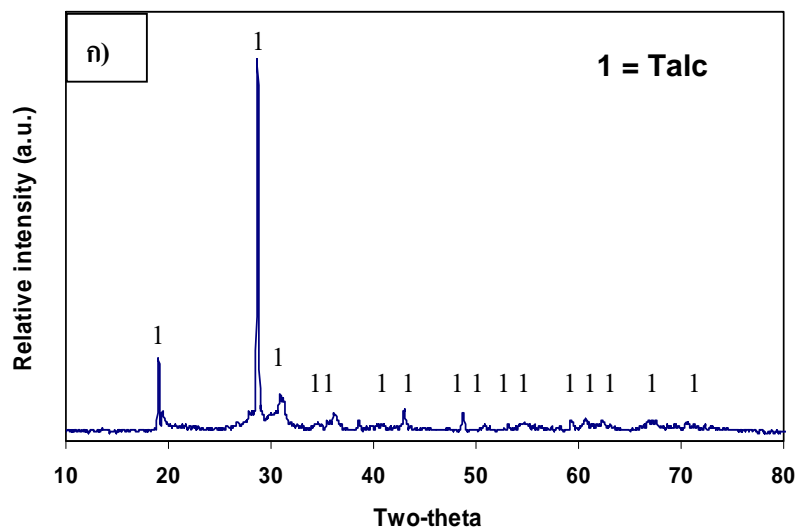
ลักษณะทางจุลภาคของผงบีตาสปอดูมิน ทัลค์ ดินคำผง และอะลูมินา สังเกตได้จากภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ดังภาพที่ 4.4 พบว่าบีตาสปอดูมินมีรูปร่างเป็นแท่งสี่เหลี่ยม ทัลค์มีรูปร่างเป็นแผ่น ดินคำผงมีรูปร่างกลมและบริเวณตรงกลางจะกลวง ส่วนอะลูมินามีรูปร่างที่ไม่แน่นอน ขนาดอนุภาคที่เห็นใกล้เคียงกับค่าการกระจายตัวของขนาดอนุภาค ยกเว้น ดินคำผงเนื่องจาก ดินผ่านกระบวนการขึ้นรูปเป็นเม็ดแกรนูล ภาพที่เห็นจึงมีขนาดอนุภาคใหญ่กว่า ค่าการกระจายตัวของขนาดอนุภาคที่วัดได้จากเครื่อง Particle Size Distribution Analyzer



ภาพที่ 4.4 ลักษณะทางจุลภาคของวัตถุดิบจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด  
 ก)บีตาสปอดูมิน ข)ทัลค์ ค)ดินคำผง RAA และ ง)อะลูมินา A31

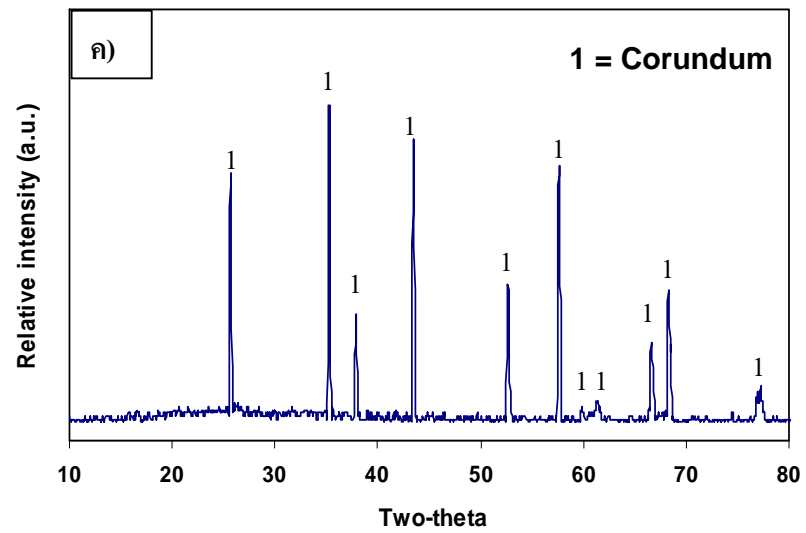
### 4.1.3 องค์ประกอบทางเฟส

ผลของตรวจสอบองค์ประกอบทางเฟสของวัตถุดิบ คือ ทัลค์ ดินคำผง และอะลูมินา ดังภาพที่ 4.5 มีดังนี้ ทัลค์ พบเฟสเดียว คือเฟสทัลค์ (Talc, JCPDS หมายเลข 002-0571) ที่มีรูปผลึกเป็นโมโนคลินิก ดินคำผง พบ 2 เฟส คือเฟสของเคโอลิไนต์ (Kaolinite, JCPDS หมายเลข 089-6538) ที่มีรูปผลึกเป็นไตรคลินิก และไมกา (Mica, JCPDS หมายเลข 002-0225) และอะลูมินา (A31) พบ 1 เฟส คือเฟสคอร์รันดัม (Corundum, JCPDS หมายเลข 046-1212) ที่มีรูปผลึกเป็นรอมโบฮีดรอล



ภาพที่ 4.5 องค์ประกอบทางเฟสของผงวัตถุดิบ ก) ทัลค์ (Talc) ข) ดินคำผง RAA (Ball clay) และ ค) อะลูมินา A31 (Alumina)





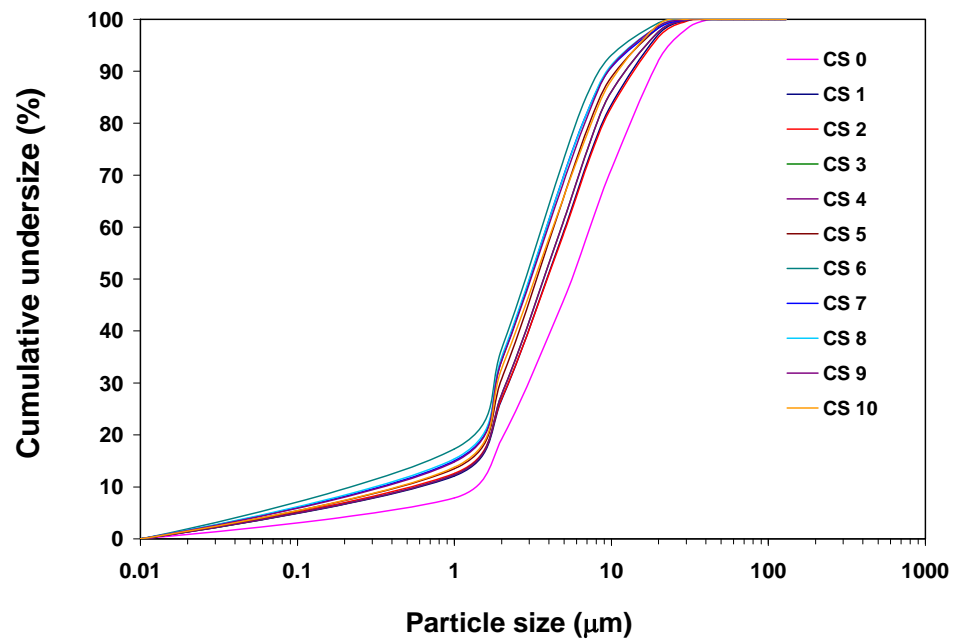
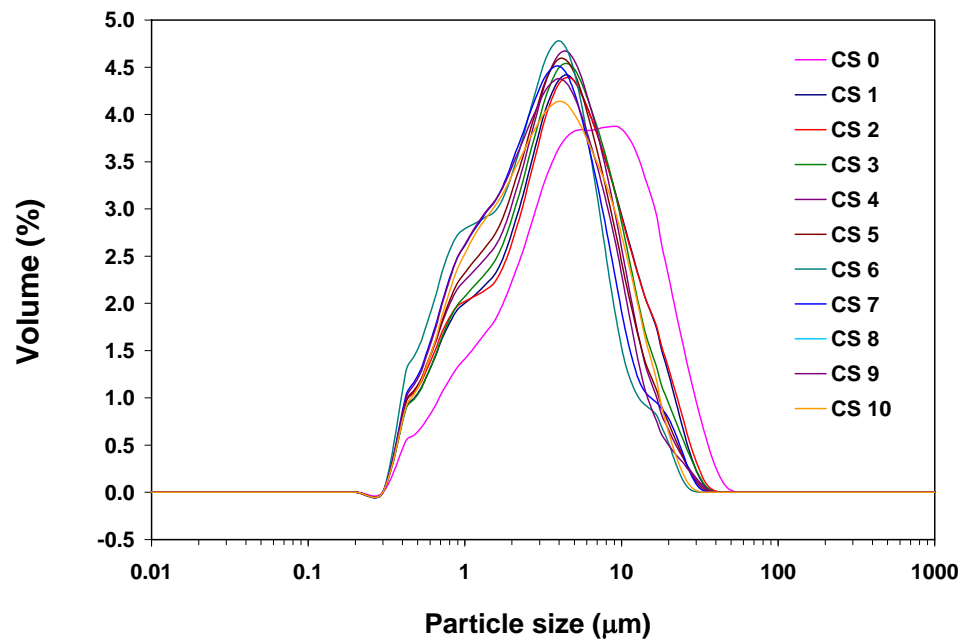
ภาพที่ 4.5(ต่อ) องค์ประกอบทางเฟสของผงวัตุดิบ ก) ทัลค์ (Talc) ข) ดินคำผง RAA (Ball clay) และ ค) อะลูมินา A31 (Alumina)

#### 4.2 การกระจายตัวขนาดอนุภาคหลังจากการบด

จากการบดลดขนาดอนุภาคของเนื้อดินสโปคูมิน/คอร์เดียไรต์ จำนวน 11 สูตร คือ สูตร CS0-CS10 ด้วยหม้อบดและลูกบดอะลูมินา บดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่า การกระจายขนาดของอนุภาคอยู่ในช่วง 0.42-58.48 ไมครอน และ ค่า  $d_{50}$  อยู่ในช่วง 2.91-5.55 ไมครอน ดังตารางที่ 4.1 และภาพที่ 4.6 การกระจายขนาดอนุภาคทั้ง 11 สูตร มีขนาดที่ใกล้เคียงกัน ยกเว้นสูตร CS0 มีค่า  $d_{50}$  เท่ากับ 5.55 ไมครอน ซึ่งมีขนาดอนุภาคสะสมที่มีขนาดใหญ่ที่สุด เนื่องจากเนื้อดินสูตรนี้มีความหนืดสูง ทำให้ประสิทธิภาพในการบดลดลง ส่งผลให้มีขนาดอนุภาคใหญ่กว่าสูตรอื่นๆ

ตารางที่ 4.1 การกระจายขนาดอนุภาคและขนาดอนุภาคสะสมหลังบด 24 ชั่วโมง

สูตร	การกระจายขนาดอนุภาคสะสมร้อยละ 50 ( $d_{50}$ ) (ไมครอน)	ช่วงการกระจายขนาดอนุภาค (ไมครอน)
CS0	5.55	0.42-58.48
CS1	3.97	0.42-42.39
CS2	4.01	0.42-47.19
CS3	3.79	0.42-42.39
CS4	3.54	0.42-47.19
CS5	3.42	0.96-42.39
CS6	2.91	0.42-34.21
CS7	3.06	0.42-38.08
CS8	3.03	0.42-38.08
CS9	3.11	0.42-42.39
CS10	3.28	0.42-34.21



ภาพที่ 4.6 ก.)การกระจายตัวขนาดอนุภาคหลังบด 24 ชั่วโมง และ ข.)การกระจายตัวสะสมของอนุภาค

### 4.3 ผลการทดสอบสมบัติต่างๆ ของชิ้นงานหลังเผา

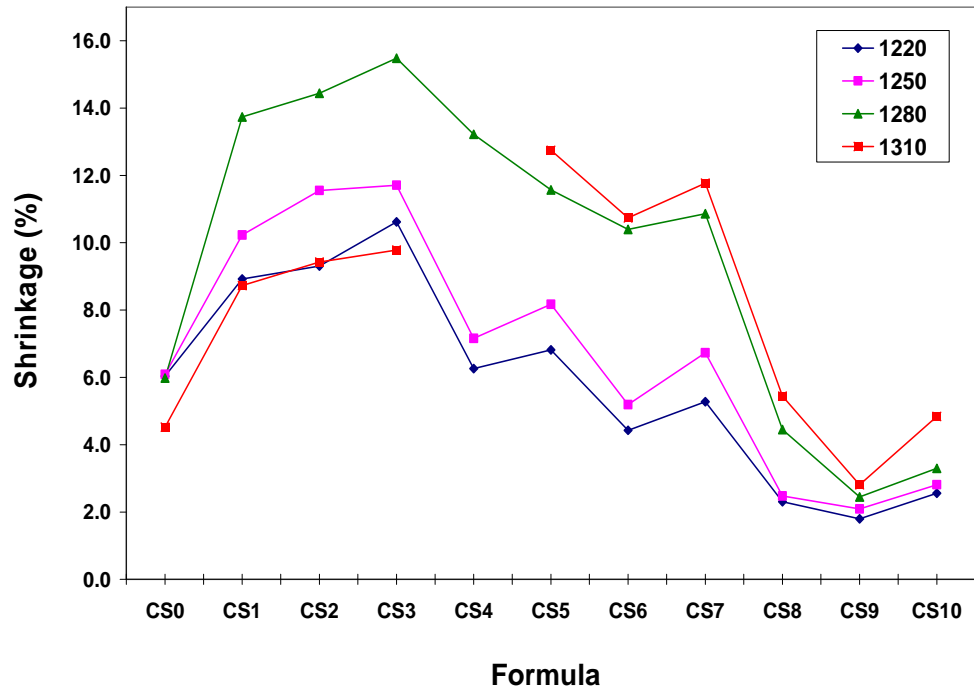
#### 4.3.1 การหดตัว

หลังจากขึ้นรูปชิ้นงานเป็นแท่งทรงกระบอกตัน แล้วนำไปอบไปแห้ง วัดชิ้นงานหลังอบแห้งพบว่า ชิ้นงานมีค่าการหดตัว (shrinkage) อยู่ระหว่าง 0.08 – 2.89 เปอร์เซ็นต์ ชิ้นงานจะหดตัวมากเมื่อส่วนผสมของดินดำผงมากขึ้น การหดตัวหลังเผาที่อุณหภูมิ 1220 1250 1280 และ 1310 องศาเซลเซียส พบว่า ชิ้นงานหลังเผา มีค่าการหดตัวมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการเผาสูงขึ้น แต่ที่อุณหภูมิ 1310 องศาเซลเซียส พบว่าสูตร CS0 – CS3 มีการขยายตัวของชิ้นงาน ส่งผลให้เมื่ออุณหภูมิการเผาสูงขึ้นมีค่าการหดตัวลดลง สูตร CS4 เกิด overfiring ทำให้ชิ้นงานเกิดการหลอม สูตร CS3 CS5 และ CS6 ชิ้นงานเกิดการยุบตัวเล็กน้อย เนื่องจากค่าการดูดซึมน้ำมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ที่ 0.27-0.03 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 1280 องศาเซลเซียส (ตารางที่ 4.3) ดังนั้นสูตร CS3-CS6 มีจุดสุกตัวที่อุณหภูมิ 1280 องศาเซลเซียส และเมื่อเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้นไป 1310 องศาเซลเซียส ชิ้นงานจึงเสียรูปและเกิดการหลอม ดังตารางที่ 4.2 และภาพที่ 4.7

ตารางที่ 4.2 การหดตัวของชิ้นงานก่อนและหลังเผาที่อุณหภูมิ 1220 1250 1280 และ 1310 องศาเซลเซียส

สูตร (Formula)	การหดตัวก่อนเผา (เปอร์เซ็นต์)	การหดตัวหลังเผา (เปอร์เซ็นต์)			
		1220 °C	1250 °C	1280 °C	1310 °C
CS0	2.89	6.04	6.09	5.98	4.52
CS1	2.91	8.92	10.23	13.74	8.75
CS2	1.71	9.31	11.55	14.44	9.43
CS3	2.39	10.62	11.71	15.48	9.78
CS4	0.86	6.26	7.16	13.22	*
CS5	0.93	6.82	8.17	11.57	12.75
CS6	0.26	4.43	5.19	10.40	10.74
CS7	0.27	5.28	6.73	10.86	11.77
CS8	0.18	2.31	2.48	4.45	5.44
CS9	0.17	1.80	2.09	2.45	2.81
CS10	0.08	2.56	2.81	3.30	4.84

หมายเหตุ \* ชิ้นงานหลอมทำให้หาค่าไม่ได้และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานแสดงไว้ในภาคผนวก ง ตารางที่ ง.1



ภาพที่ 4.7 การหดตัวรวมของชิ้นงานหลังเผาที่อุณหภูมิ 1220 1250 1280 และ 1310 องศาเซลเซียส

#### 4.3.2 การดูดซึมน้ำ และความหนาแน่น

ผลของค่าการดูดซึมน้ำ (water absorption) หลังเผา พบว่า มีค่าการดูดซึมน้ำอยู่ระหว่าง 0.03-23.56 เปอร์เซ็นต์ เมื่ออุณหภูมิในการเผาสูงขึ้น ค่าการดูดซึมน้ำมีค่าลดลง แต่ในสูตรเนื้อดิน CS2-CS6 มีค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นเล็กน้อยหลังเผาที่อุณหภูมิ 1310 องศาเซลเซียส และมีค่าการดูดซึมน้ำต่ำกว่า 0.1 เปอร์เซ็นต์ หลังเผาที่อุณหภูมิ 1280 องศาเซลเซียส พบว่าในสูตร CS10 (บิตาสปอดูมิน) มีค่าการดูดซึมน้ำสูงสุด คือ 23.56 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 1220 องศาเซลเซียส ดังนั้น การผสมกันของบิตาสปอดูมินและคอร์เดียไรต์ ในอัตราส่วนผสมที่มีสปอดูมิน ตั้งแต่ 20-60 เปอร์เซ็นต์ คอร์เดียไรต์ ตั้งแต่ 40-80 เปอร์เซ็นต์ สามารถทำให้ค่าการดูดซึมน้ำลดลงโดยมีค่าต่ำกว่า 0.1 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 1280 องศาเซลเซียส แต่ ขึ้นงานหลังเผาที่อุณหภูมิ 1220-1250 องศาเซลเซียส ที่มีอัตราส่วนผสมสปอดูมินและคอร์เดียไรต์ตั้งแต่ 40-50 เปอร์เซ็นต์ (สูตร CS4-CS5) มีผลในทางตรงกันข้ามคือมีค่าการดูดซึมน้ำสูงขึ้น อาจเป็นเพราะที่อัตราส่วนผสมนี้เริ่มมีปริมาณบิตาสปอดูมิน และคอร์เดียไรต์ในปริมาณที่เกือบจะเท่ากันๆ ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิการเผายังไม่สูงพอหรือต่ำกว่าจุดหลอมตัวของทั้งบิตาสปอดูมินและคอร์เดียไรต์ จึงทำให้การดูดซึมน้ำมีค่าสูงที่ 15.99-16.57 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่สูตร CS0 (คอร์เดียไรต์) และ CS10 (บิตาสปอดูมิน) หลังเผาที่อุณหภูมิ 1310 องศาเซลเซียส ยังมีค่าการดูดซึมน้ำสูงถึง 9.32 และ 14.31 เปอร์เซ็นต์ ดังตารางที่ 4.3 และภาพที่ 4.8

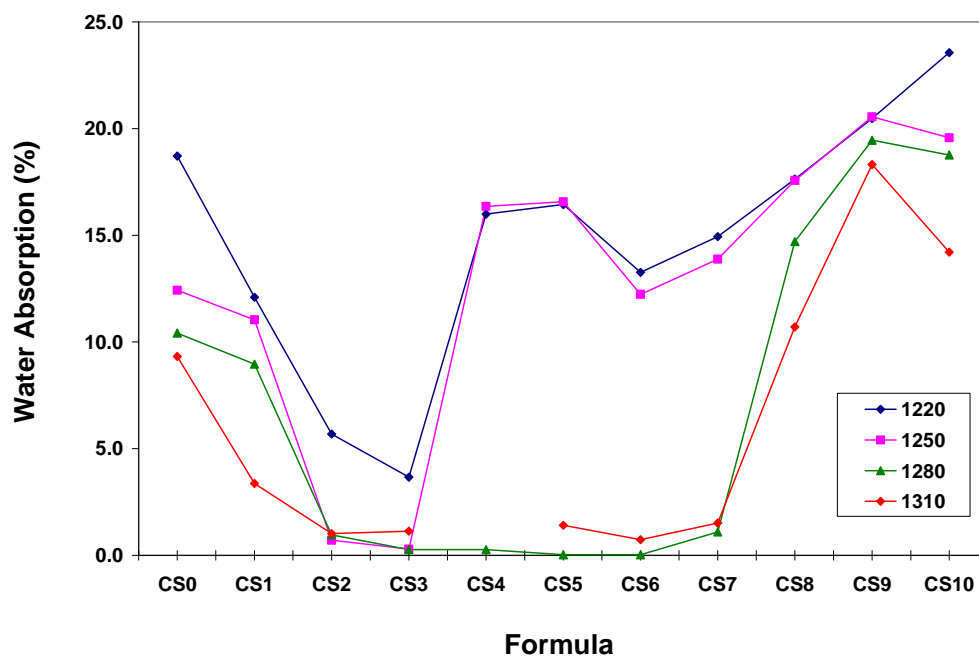
ค่าความหนาแน่นรวม (Bulk density) พบว่าในสูตร CS10 (บิตาสปอดูมิน) มีค่าความหนาแน่นต่ำกว่า สูตร CS0 (คอร์เดียไรต์) โดยสูตร CS10 มีค่าความหนาแน่นต่ำสุดที่ 1.59 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 1220 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นผลมาจากชิ้นงานยังมีค่าการดูดซึมน้ำสูงถึง 23.56 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ สูตร CS0 (คอร์เดียไรต์) ค่าความหนาแน่นที่ 1.79 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร และมีค่าการดูดซึมน้ำต่ำกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเผาที่อุณหภูมิเดียวกัน ดังนั้นในสูตรที่มีส่วนผสมของบิตาสปอดูมินในอัตราส่วนที่สูงมากกว่า 71 เปอร์เซ็นต์ ส่งผลให้มีค่าความหนาแน่นต่ำ ส่วนแนวโน้ของผลในอัตราส่วนอื่นๆ พบว่าเมื่ออุณหภูมิการเผาสูงขึ้นค่าความหนาแน่นมีค่าสูงขึ้น และที่อุณหภูมิ 1310 องศาเซลเซียส สูตร CS5 มีค่าความหนาแน่นรวมสูงสุดคือ 2.25 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร ดังตารางที่ 4.4 และภาพที่ 4.9

จากผลค่าการดูดซึมน้ำและความหนาแน่นรวม พบว่าวัสดุเชิงประกอบสปอดูมิน/คอร์เดียไรต์ เมื่อนำมาผสมกัน จะช่วยลดอุณหภูมิจุดสุกตัวของกันและกัน โดยจุดสุกตัวจะลดลงอยู่ที่อุณหภูมิประมาณ 1280 องศาเซลเซียส ปกติแล้วสปอดูมินมีจุดสุกตัวที่อุณหภูมิ 1423 องศาเซลเซียส และ คอร์เดียไรต์มีจุดสุกตัวที่อุณหภูมิ 1350 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.3 การดูดซึมน้ำของชิ้นงานหลังเผาที่อุณหภูมิ 1220 1250 1280 และ 1310 องศาเซลเซียส

สูตร (Formula)	การดูดซึมน้ำ (%)			
	1220 °C	1250 °C	1280 °C	1310 °C
CS0	18.71	12.24	10.42	9.32
CS1	12.09	11.04	8.96	3.37
CS2	5.68	0.71	0.96	1.02
CS3	3.66	0.29	0.27	1.13
CS4	15.99	16.35	0.27	*
CS5	16.44	16.57	0.03	1.41
CS6	13.26	12.23	0.03	0.73
CS7	14.94	13.88	1.10	1.51
CS8	17.63	17.57	14.70	10.70
CS9	20.47	20.55	19.45	18.31
CS10	23.56	19.57	18.76	14.21

หมายเหตุ \* ชิ้นงานหลอมทำให้หาค่าไม่ได้และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานแสดงไว้ในภาคผนวก ง ตารางที่ 3

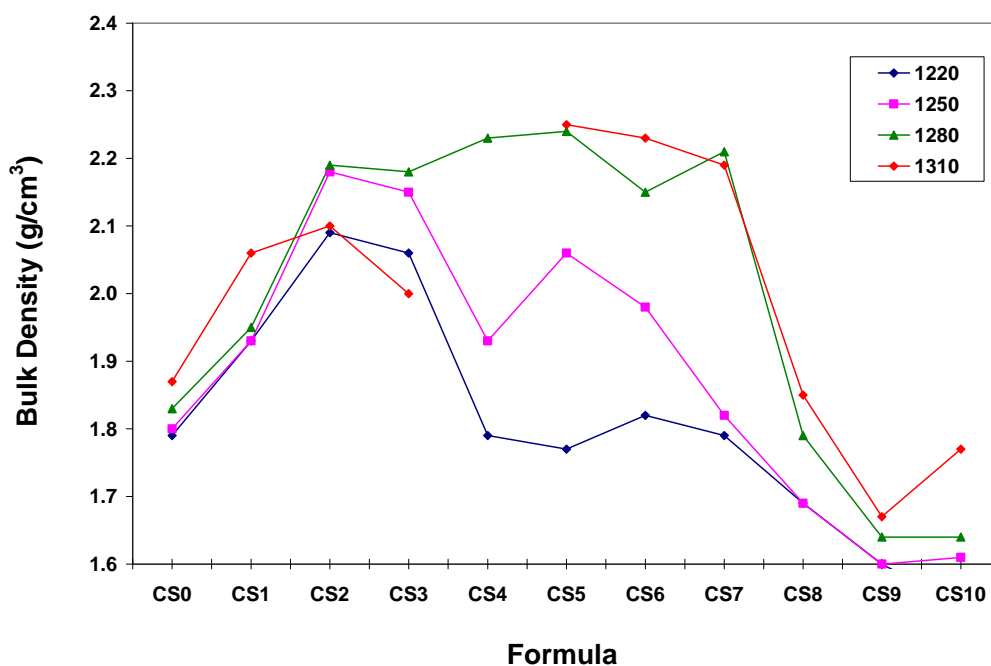


ภาพที่ 4.8 การดูดซึมน้ำของชิ้นงานหลังเผาที่อุณหภูมิ 1220 1250 1280 และ 1310 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.4 ความหนาแน่นของชิ้นงานหลังเผาที่อุณหภูมิ 1220 1250 1280 และ 1310 องศาเซลเซียส

สูตร (Formula)	ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )			
	1220 °C	1250 °C	1280 °C	1310 °C
CS0	1.79	1.80	1.83	1.87
CS1	1.93	1.93	1.95	2.06
CS2	2.09	2.18	2.19	2.10
CS3	2.06	2.15	2.18	2.00
CS4	1.79	1.93	2.23	*
CS5	1.77	2.06	2.24	2.25
CS6	1.82	1.98	2.15	2.23
CS7	1.79	1.82	2.21	2.19
CS8	1.69	1.69	1.79	1.85
CS9	1.60	1.60	1.64	1.67
CS10	1.54	1.61	1.64	1.77

หมายเหตุ \* ชิ้นงานหลอมทำให้หาค่าไม่ได้และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานแสดงไว้ในภาคผนวก ง ตารางที่ 4



ภาพที่ 4.9 ความหนาแน่นของชิ้นงานหลังเผาที่อุณหภูมิ 1220 1250 1280 และ 1310 องศาเซลเซียส



### 4.3.3 ความแข็งแรง

ค่าความแข็งแรง (strength) ของชิ้นงานหลังเผา พบว่า ในสูตร CS5 เผาที่อุณหภูมิ 1280 องศาเซลเซียส มีค่าความแข็งแรงสูงสุดคือ 75 เมกะพาสคัล และที่อุณหภูมิ 1310 องศาเซลเซียส พบว่า สูตร CS2 มีค่าความแข็งแรงต่ำสุดที่ 2.83 เมกะพาสคัล ดังตารางที่ 4.5 และภาพที่ 4.12 จากการสังเกตหลังการทดสอบชิ้นงานพบ รอยแตกของชิ้นงาน มีลักษณะรอยแตกด้านหนึ่งเป็นเหมือนมีภูเขาอยู่กลางชิ้นงาน และอีกด้านหนึ่งเป็นเหมือนหลุมลึกลงในชิ้นงาน ดังภาพที่ 4.10 และ 4.11 และพบรอยแตกแบบเดียวกันในสูตร CS0 - CS3 อาจเนื่องจากสูตร CS0 - CS3 มีส่วนผสมของดินค้ำผงในปริมาณที่มากกว่า 30 เปอร์เซ็นต์ ทำให้น้ำดินมีความหนืดสูง น้ำดินมีลักษณะเป็นวุ้นเมื่อปล่อยให้แห้งไว้สักครู่เดียว แม้จะเพิ่มสารช่วยกระจายลอยตัวแล้วก็ตาม เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการแตกร้าวภายใน เป็นผลให้เกิดค่าความแข็งแรงต่ำ เมื่ออัตราส่วนผสมที่มีสปอคูมินตั้งแต่ 40 เปอร์เซ็นต์ ขึ้นไป ชิ้นงานมีค่าความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น



ภาพที่ 4.10 รอยแตกของชิ้นงานหลังเผาในสูตร CS 0

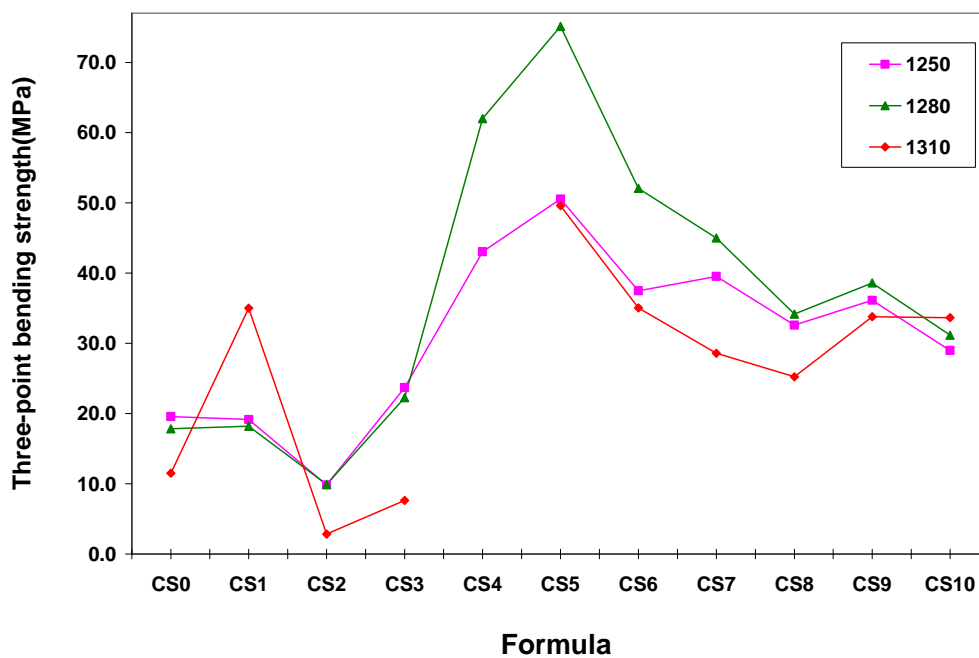


ภาพที่ 4.11 รอยแตกของชิ้นงานหลังเผาสูตร CS0-CS10

ตารางที่ 4.5 ความแข็งแรงหลังเผาของชิ้นงานที่อุณหภูมิ 1220 1250 1280 และ 1310 องศาเซลเซียส

สูตร (Formula)	ความแข็งแรงหลังเผา (MPa)		
	1250 °C	1280 °C	1310 °C
CS0	19.58	17.81	11.50
CS1	19.14	18.20	35.00
CS2	9.83	9.91	2.83
CS3	23.70	22.25	7.61
CS4	43.04	61.99	*
CS5	50.54	75.11	49.58
CS6	37.49	52.07	35.04
CS7	39.51	45.00	28.58
CS8	32.59	34.15	25.22
CS9	36.13	38.59	33.78
CS10	28.98	31.16	33.65

หมายเหตุ \* ชิ้นงานหลอมทำให้หาค่าไม่ได้และค่าเขียนบนมาตรฐานแสดงไว้ในภาคผนวก ง ตารางที่ 2



ภาพที่ 4.12 ความแข็งแรงหลังเผาของชิ้นงานที่อุณหภูมิ 1250 1280 และ 1310 องศาเซลเซียส

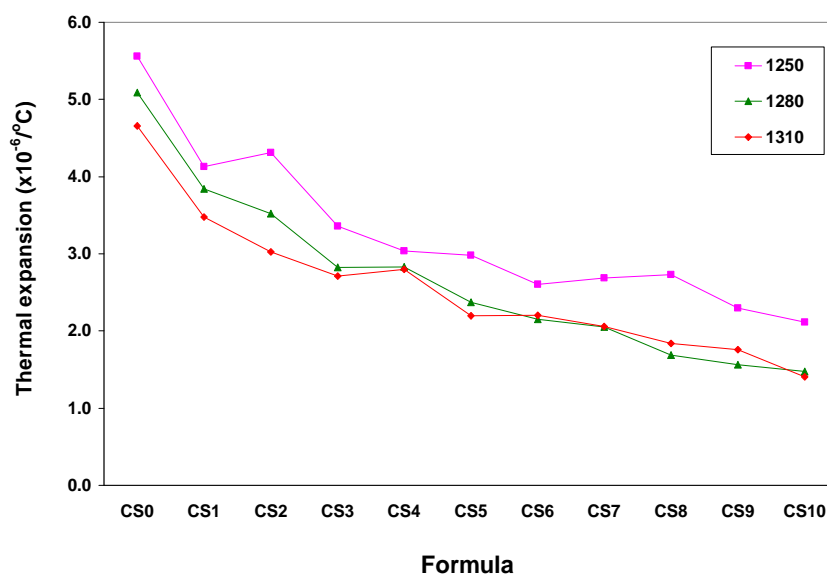
#### 4.3.4 ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน

ผลค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน (thermal expansion coefficient) ของชิ้นงานหลังเผาที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่า สูตร CS0 (คอร์เคียวไรต์) เผาที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนสูงสุด คือ  $5.561 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$  และสูตร CS10 (บิตาสปอดูมิน) เผาที่อุณหภูมิ 1310 องศาเซลเซียส มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำสุด คือ  $1.405 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$  เมื่ออัตราส่วนผสมของสปอดูมินเพิ่มมากขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนมีค่าลดลงในทุกสูตร เนื่องจากบิตาสปอดูมินมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำกว่า คอร์เคียวไรต์ ดังนั้นเพียงมีอัตราส่วนผสมของสปอดูมิน 10 เปอร์เซ็นต์ ก็ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของคอร์เคียวไรต์ลดลงมากกว่า  $1 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$  เช่น สูตร CS1 ที่อุณหภูมิ 1310 องศาเซลเซียส ดังตารางที่ 4.6 และภาพที่ 4.13

นอกจากนี้พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนลดลง เมื่ออุณหภูมิในการเผาสูงขึ้น ชิ้นงานหลังเผาที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส ยังความพรุนตัวสูงซึ่งมีค่าการดูดซึมน้ำสูงมากกว่า 10 เปอร์เซ็นต์ และความหนาแน่นของชิ้นงานต่ำกว่า 2.00 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร (ดังตารางที่ 4.3 และ 4.4) เมื่อชิ้นงานยังมีช่องว่างหรือรูพรุนภายในชิ้นงานเป็นจำนวนมาก เมื่อให้ความร้อนแก่ชิ้นงานเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ อนุภาคภายในชิ้นงานสามารถเกิดการขยายตัวได้ ซึ่งคล้ายกับภาวะเอิร์ธเร็นแวน์ ที่สามารถตั้งบนเตาถ่านได้เนื่องจากมีความพรุนตัวสูง เมื่อถูกความร้อนอนุภาคเกิดการขยายตัวได้ จึงไม่เกิดความเครียดสะสมในเนื้อและไม่เกิดการแตกในขณะที่ใช้งานบนเตาถ่าน แต่ในทางกลับกันเมื่อเผาชิ้นงานที่อุณหภูมิสูงขึ้นไป 1280 - 1310 องศาเซลเซียส ชิ้นงานมีค่าการดูดซึมน้ำต่ำกว่า 0.08 เปอร์เซ็นต์ และมีความหนาแน่นสูงขึ้น ภายในไม่มีช่องว่างหรือรูพรุนให้อนุภาคขยายตัวได้ ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนที่วัดได้มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิการเผาสูงขึ้น

ตารางที่ 4.6 ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของชิ้นงานหลังเผาที่อุณหภูมิ 1250 1280 และ 1310 องศาเซลเซียส (ทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 25-1000 °C)

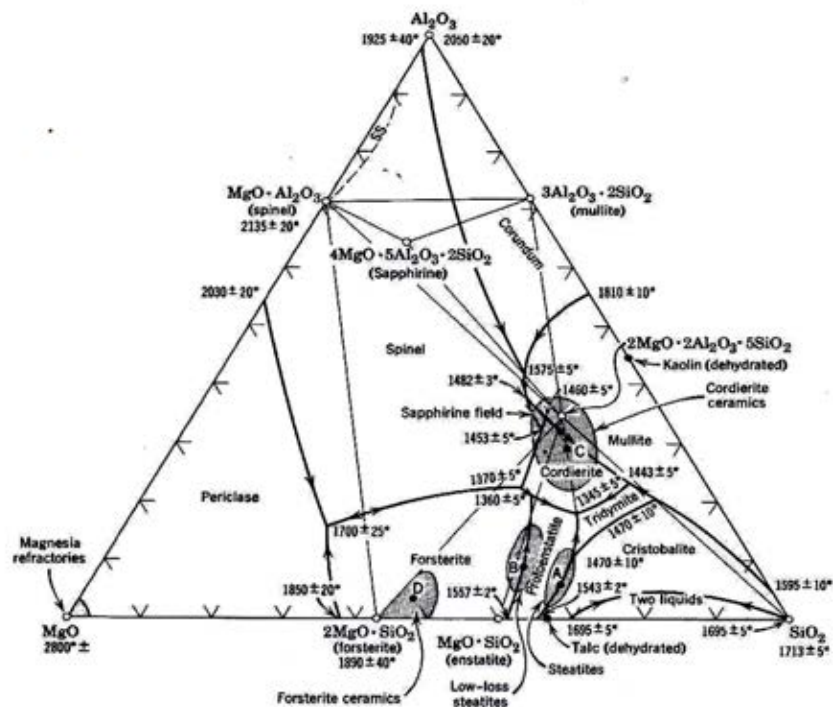
สูตร	ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน ที่อุณหภูมิ 25-1000 °C ( $\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )		
	1250 °C	1280 °C	1310 °C
CS0	5.561	5.091	4.659
CS1	4.128	3.840	3.480
CS2	4.311	3.522	3.024
CS3	3.359	2.826	2.712
CS4	3.036	2.828	2.802
CS5	2.979	2.375	2.199
CS6	2.602	2.154	2.205
CS7	2.686	2.055	2.060
CS8	2.727	1.686	1.837
CS9	2.300	1.562	1.759
CS10	2.118	1.475	1.405



ภาพที่ 4.13 ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของชิ้นงานหลังเผาที่อุณหภูมิ 1250 1280 และ 1310 องศาเซลเซียส (ทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 25-1000 °C)

#### 4.3.5 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟส

องค์ประกอบทางเฟสหลังเผาชิ้นงานที่อุณหภูมิ 1250 และ 1280 องศาเซลเซียส พบว่าชิ้นทดสอบสูตร CS0 และ CS1 ประกอบด้วย 2 เฟส คือ คอर्डีไรต์ และสปิเนล ชิ้นงานสูตร CS3 - CS6 ประกอบด้วย 3 เฟส คือ คอर्डีไรต์ บิตาสปอคูมิน และสปิเนล ชิ้นทดสอบสูตร CS7 - CS9 ประกอบด้วย 2 เฟส คือ บิตาสปอคูมิน และสปิเนล เมื่อเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลมาตรฐาน (JCPDS) เริ่มพบเฟสบิตาสปอคูมินเมื่อเติมสปอคูมิน 20-60 เปอร์เซ็นต์ (สูตร CS2-CS6) และเมื่อเติมสปอคูมิน 70-90 เปอร์เซ็นต์ จะไม่พบเฟสคอर्डีไรต์ เมื่อเผาชิ้นงานที่อุณหภูมิ 1250-1280 องศาเซลเซียส พบว่าผลขององค์ประกอบทางเฟสของทุกสูตรมีความคล้ายคลึงกัน ดังตารางที่ 4.7 และ ภาพที่ 4.15 และ 4.16 จากผลการทดลองพบว่าในสูตร CS0 (C100:S0) ไม่เกิดเฟสคอर्डีไรต์เพียงเฟสเดียว แต่มีเฟสเกิดร่วมคือ สปิเนล ซึ่งจากเฟสไดอะแกรมดังภาพที่ 4.14 พบว่าเฟสคอर्डีไรต์เกิดในช่วงอุณหภูมิที่แคบที่อุณหภูมิประมาณ 1450 องศาเซลเซียส แต่สปิเนล ( $MgO \cdot Al_2O_3$ ) เกิดในช่วงอุณหภูมิที่กว้าง ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิในการเผายังไม่สูงพอที่จะทำให้ส่วนผสม ทัลค์ อะลูมินา และ ดิน เกิดเป็นคอर्डีไรต์ได้อย่างสมบูรณ์ ดังนั้นอาจเกิดเฟสสปิเนลก่อนซึ่งเป็นเฟสทางผ่านที่นำไปสู่การรวมกันของส่วนผสมต่างๆ ให้เกิดเป็นเฟสคอर्डีไรต์ ถ้ามีอุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งถ้าเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้นอาจเกิดการยุบตัวของเนื้อดินได้



ภาพที่ 4.14 เฟสไดอะแกรมของ ระบบ  $MgO-Al_2O_3-SiO_2$

ตารางที่ 4.7 องค์ประกอบทางเฟสของชิ้นงานหลังเผาที่อุณหภูมิ 1250 และ 1280 องศาเซลเซียส

สูตร	เฟสที่พบหลังเผา	
	1250 °C	1280 °C
CS0	คอร์เดียไรต์ และสปีเนล	คอร์เดียไรต์ และสปีเนล
CS1	คอร์เดียไรต์ และสปีเนล	คอร์เดียไรต์ และสปีเนล
CS2	คอร์เดียไรต์ บีตาสปอดูมิน และสปีเนล	คอร์เดียไรต์ บีตาสปอดูมิน และสปีเนล
CS3	คอร์เดียไรต์ บีตาสปอดูมิน และสปีเนล	คอร์เดียไรต์ บีตาสปอดูมิน และสปีเนล
CS4	คอร์เดียไรต์ บีตาสปอดูมิน และสปีเนล	คอร์เดียไรต์ บีตาสปอดูมิน และสปีเนล
CS5	คอร์เดียไรต์ บีตาสปอดูมิน และสปีเนล	คอร์เดียไรต์ บีตาสปอดูมิน และสปีเนล
CS6	คอร์เดียไรต์ บีตาสปอดูมิน และสปีเนล	คอร์เดียไรต์ บีตาสปอดูมิน และสปีเนล
CS7	บีตาสปอดูมิน และสปีเนล	บีตาสปอดูมิน และสปีเนล
CS8	บีตาสปอดูมิน และสปีเนล	บีตาสปอดูมิน และสปีเนล
CS9	บีตาสปอดูมิน และสปีเนล	บีตาสปอดูมิน
CS10	บีตาสปอดูมิน	บีตาสปอดูมิน

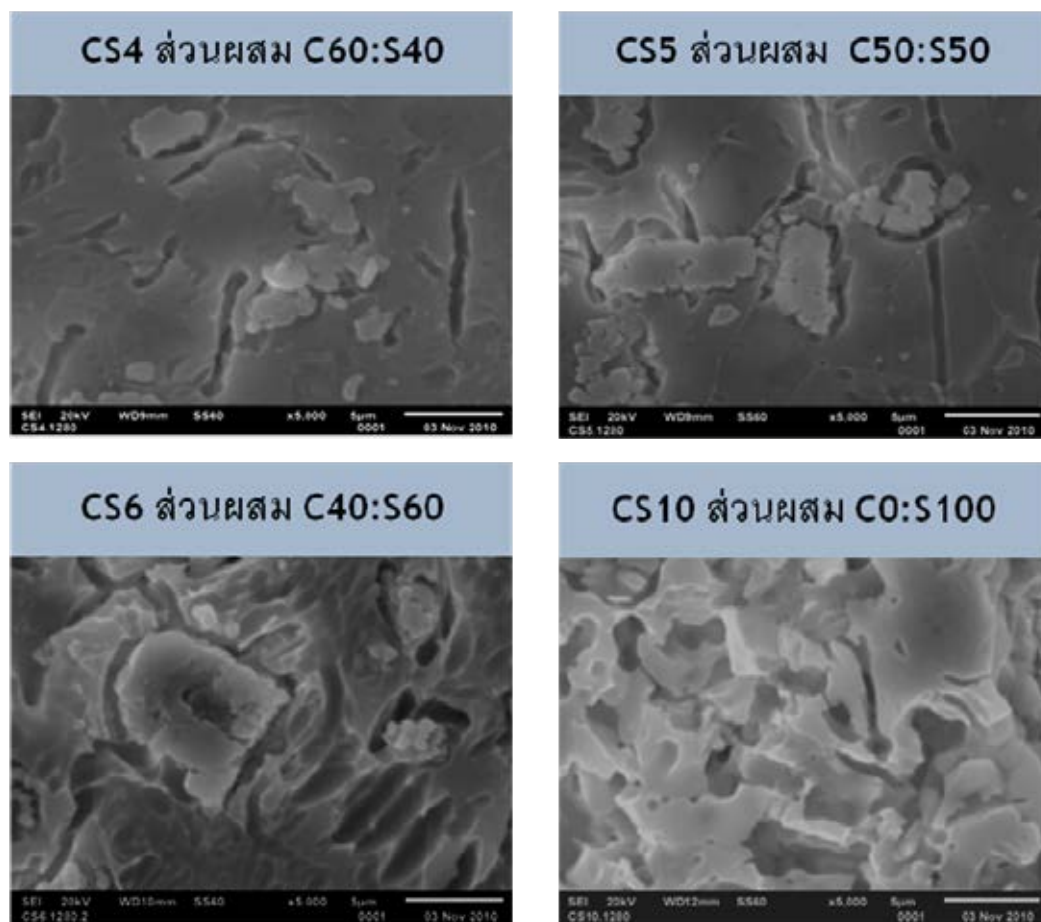






#### 4.3.6 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

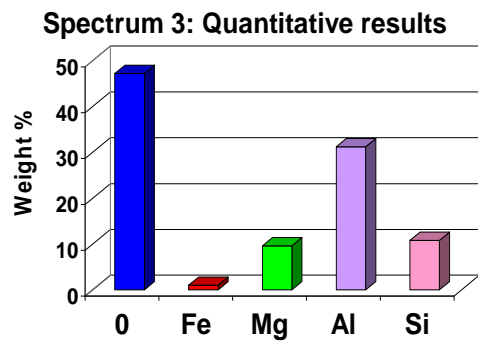
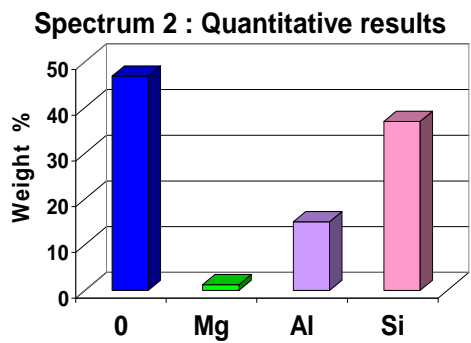
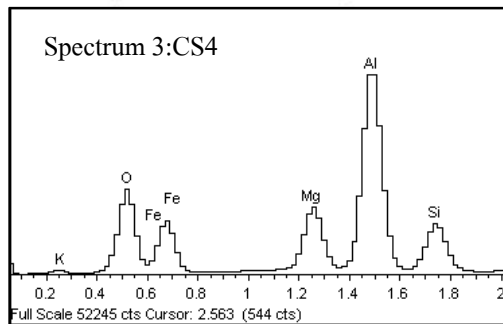
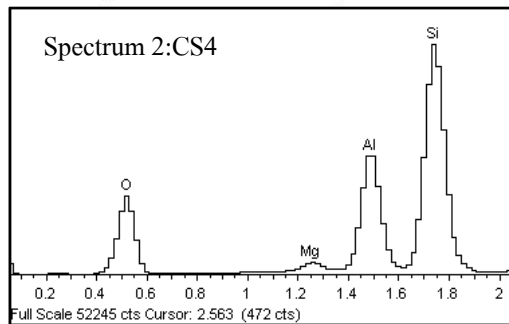
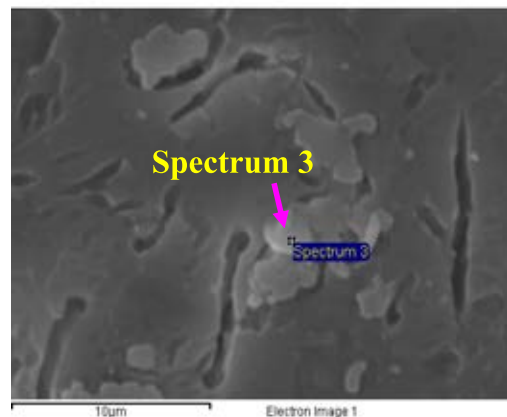
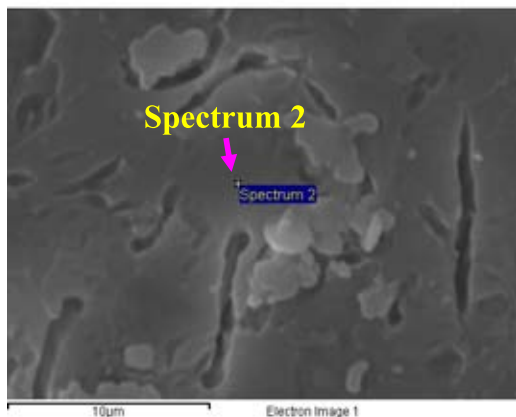
ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง Energy Dispersive X-ray Analyzer (EDX) ชิ้นงานที่เผาอุณหภูมิ 1280 องศาเซลเซียส สูตร CS4 CS5 CS6 และ CS10 พบว่าวัสดุพื้นคือ บิตาสปอคูมิน ส่วนคอร์เคียวไรต์เป็นวัสดุเสริมที่มีลักษณะเกิดเป็นผลึกมีรูปร่างที่ไม่แน่นอนเกิดแทรกตัวในวัสดุพื้นในลักษณะเกิดกระจายตัวอยู่ทั่วรูปผลึกของคอร์เคียวไรต์มีขนาดใหญ่มากขึ้น เมื่อส่วนผสมมีปริมาณบิตาสปอคูมินเพิ่มมากขึ้น เกิดมี glassy phase ขึ้น เนื่องจากมีส่วนผสมของซิลิกาในปริมาณที่มาก โดยสังเกตได้จากก่อนนำชิ้นงานกัดกรดไฮโดรฟลูออริกแล้วนำไปตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคไม่พบโครงสร้างหรือหลุมใดๆ แต่หลังจากกัดกรดดังกล่าวก็ปรากฏให้เห็นดังภาพที่ 4.17 ถึง 4.21



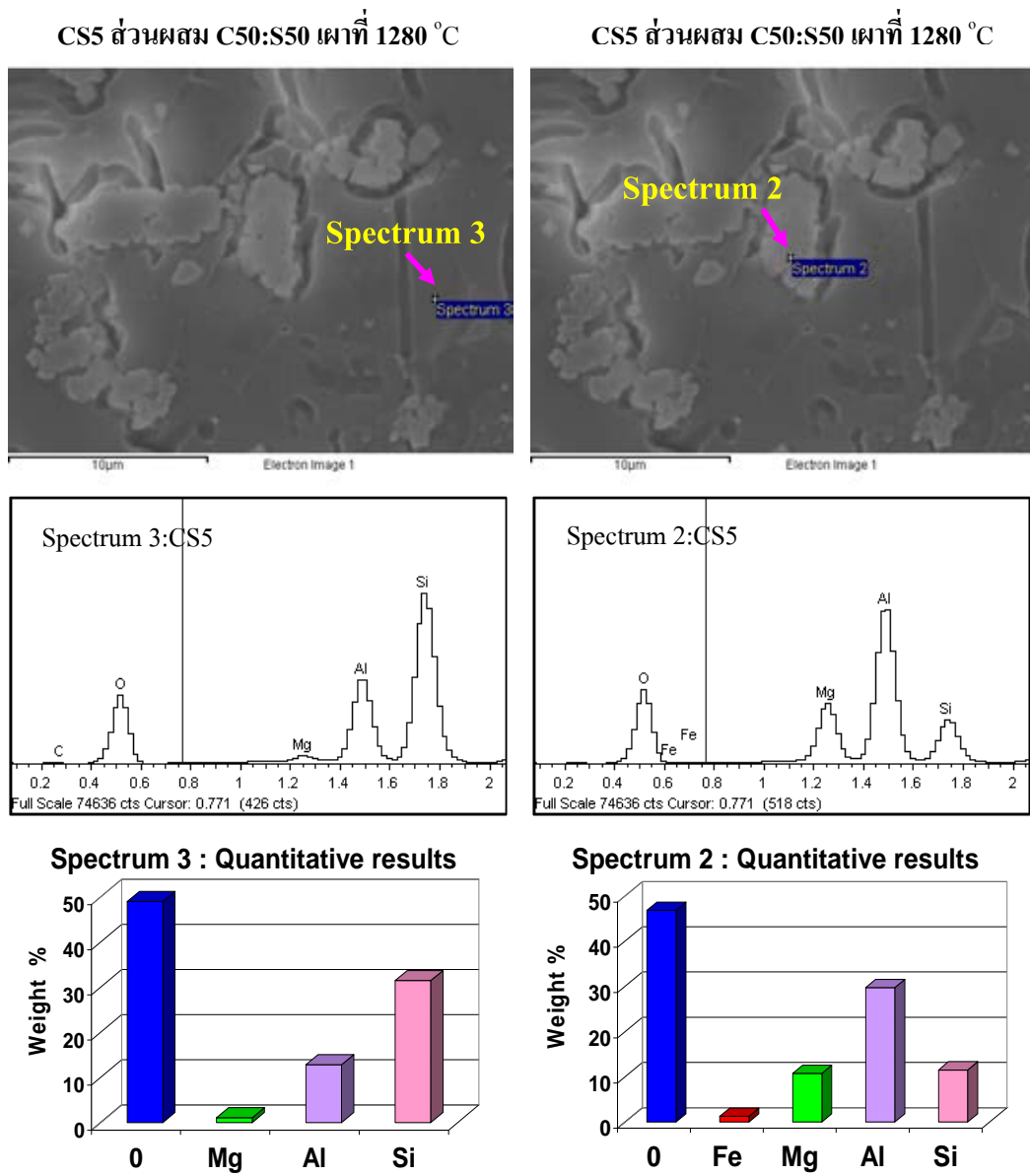
ภาพที่ 4.17 โครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานสูตร CS4 – CS10 ซึ่งทำการเผาที่อุณหภูมิ 1280 °C (กำลังขยาย 5000 เท่า)

CS4 ส่วนผสม C60:S40 เเผาที่ 1280 °C

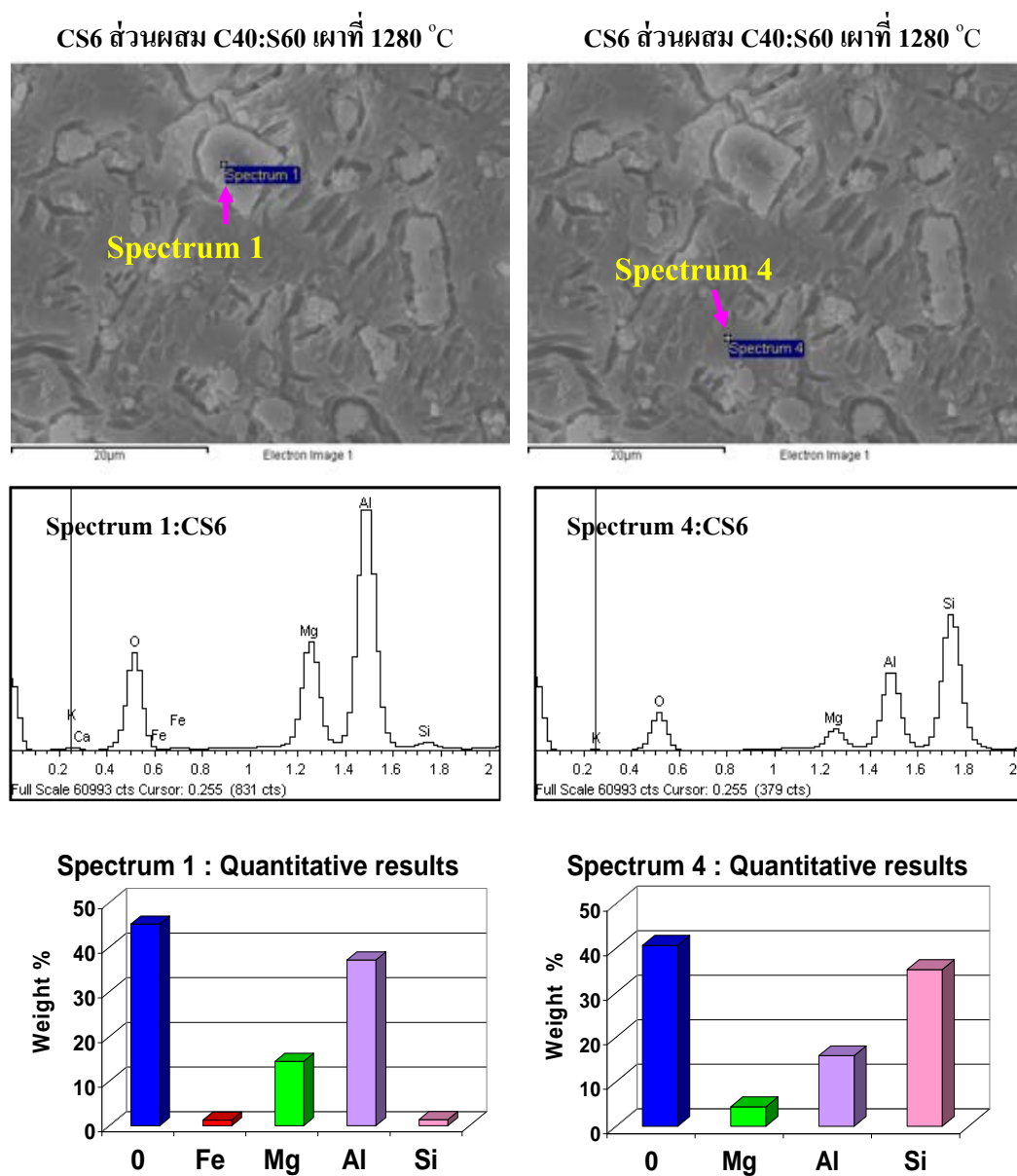
CS4 ส่วนผสม C60:S40 เเผาที่ 1280 °C



ภาพที่ 4.18 โครงสร้างทางจุลภาค (SEM) และการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง (EDX) ของชิ้นงานสูตร CS4 หลังเผาที่อุณหภูมิ 1280 °C (กำลังขยาย 5000 เท่า)

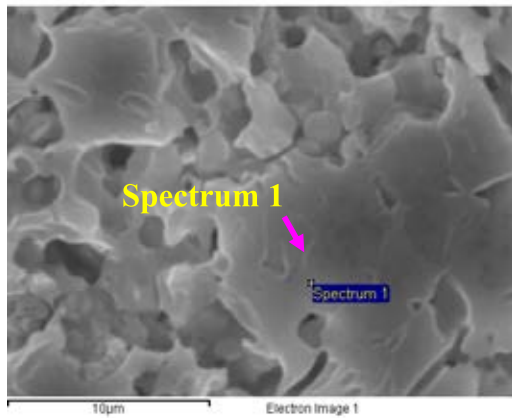


ภาพที่ 4.19 โครงสร้างทางจุลภาค (SEM) และการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง (EDX) ของชิ้นงานสูตร CS5 หลังเผาที่อุณหภูมิ 1280 °C (กำลังขยาย 5000 เท่า)

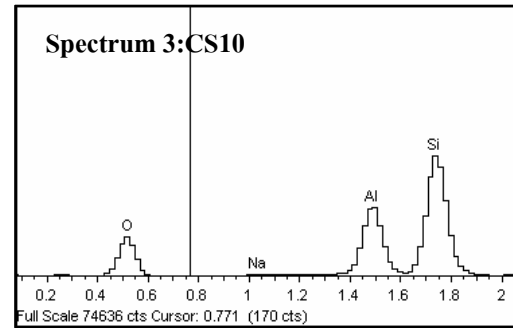
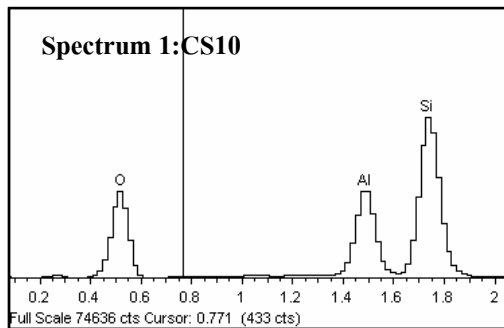
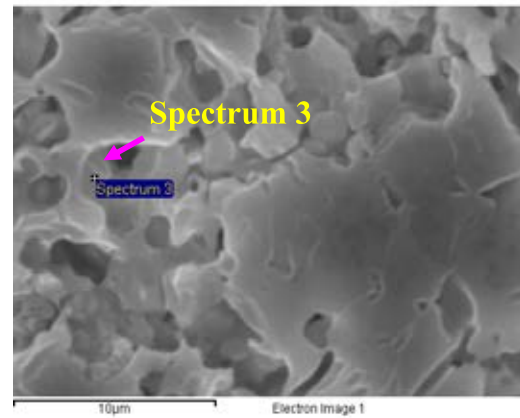


ภาพที่ 4.20 โครงสร้างทางจุลภาค (SEM) และการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง (EDX) ของชิ้นงานสูตร CS6 หลังเผาที่อุณหภูมิ 1280 °C (กำลังขยาย 2500 เท่า)

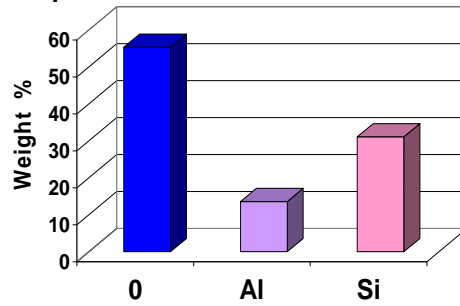
CS10 ส่วนผสม C0:S100 เเผาที่ 1280 °C



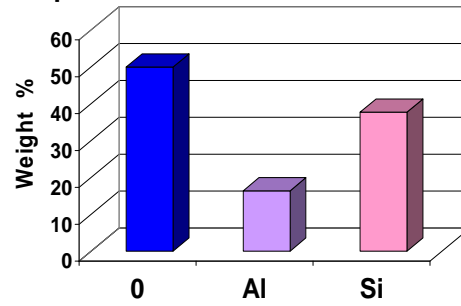
CS10 ส่วนผสม C0:S100 เเผาที่ 1280 °C



Spectrum 1 : Quantitative results



Spectrum 3 : Quantitative results



ภาพที่ 4.21 โครงสร้างทางจุลภาค (SEM) และการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง (EDX) ของชิ้นงานสูตร CS10 หลังเผาที่อุณหภูมิ 1280 °C (กำลังขยาย 5000 เท่า)

#### 4.3.7 ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างเฉียบพลัน

จากผลการทดลองข้างต้นได้คัดเลือกสูตรเนื้อดิน CS4, CS5, CS6 และ CS7 เผาที่อุณหภูมิ 1280 องศาเซลเซียส เนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำกว่า  $3 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$  และมีค่าการดูดซึมน้ำต่ำ มาทดสอบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างเฉียบพลัน (Thermal shock) ตามวิธีมาตรฐาน ASTM -554-93 ที่อุณหภูมิ 150 - 400 °C พบว่า สูตร CS4 เกิดรอยร้าวที่อุณหภูมิ 325 องศาเซลเซียส สูตร CS5 เกิดรอยร้าวที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ส่วนสูตร CS6 และ CS7 ไม่เกิดการแตกร้าว เนื่องจากสูตร CS6 (C:40, S:60) และ CS7 (C:30, S:70) มีส่วนผสมของบิตาสปอคูมินมากกว่าคอร์เดียไรต์ และจากการตรวจสอบองค์ประกอบทางเฟสที่พบเฟสหลักคือบิตาสปอคูมิน พบเฟสรองคือ คอร์เดียไรต์ และสปีเนลเพียงเล็กน้อย ดังนั้นปริมาณบิตาสปอคูมินที่เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ชิ้นงานมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำลง ส่งผลให้ชิ้นงานมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ สามารถต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างเฉียบพลันได้ดี ดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างเฉียบพลัน ตามวิธีมาตรฐาน ASTM -554-93 ที่อุณหภูมิ 150 – 400 องศาเซลเซียส

สูตร	ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน ( $\times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ )	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างเฉียบพลันที่อุณหภูมิ 150 - 400 °C
CS 4	2.828	ไม่ผ่าน
CS 5	2.375	ไม่ผ่าน
CS 6	2.154	ผ่าน
CS 7	2.055	ผ่าน

#### 4.3.8 ผลค่าการนำความร้อน

จากผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างเฉียบพลัน ได้นำสูตรเนื้อดิน CS5 CS6 และ CS7 เผาที่อุณหภูมิ 1280 องศาเซลเซียส หาค่าการนำความร้อน พบว่า ค่าการนำความร้อนมีค่าต่ำ (thermal conductivity) อยู่ระหว่าง 1.03-1.59 วัตต์ต่อเมตรต่อเคลวินและมีค่าความจุความร้อนจำเพาะ (specific heat capacity) อยู่ระหว่าง 0.721-0.855 จูลต่อกรัมต่อเคลวิน ซึ่งโดยปกติแล้ว เซรามิกส่วนใหญ่มีค่าการนำความร้อนต่ำ เนื่องจากเป็นฉนวน ดังนั้นค่าการนำความร้อนของวัสดุประกอบสโปคูมิน/คอร์เดียไรต์ มีค่าที่ต่ำกว่าเพียงเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับค่าการนำความร้อนของเนื้อคอร์เดียไรต์ที่มีขายตามท้องตลาดทั่วไป ( $\sim 1.13$  วัตต์ต่อเมตรต่อเคลวิน<sup>(62)</sup>) ดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ค่าการนำความร้อน และ ค่าความจุความร้อนจำเพาะ ของชิ้นงานสูตร CS5 CS6 และ CS 7 เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 1280 องศาเซลเซียส

สูตร	อุณหภูมิ (°C)	ค่าการนำความร้อน (W/mK)	ค่าความจุความร้อนจำเพาะ (J/g.K)
CS 5	31.7	1.59	0.855
CS 6		1.03	0.721
CS 7		1.07	0.852

#### 4.4 ผลของการทดลองขึ้นรูปชิ้นงานตัวอย่างผลิตภัณฑ์ต้นแบบ

จากผลการทดสอบความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างเฉียบพลัน ได้คัดเลือกสูตรเนื้อดินสูตร CS6 (อัตราส่วน สปอคูมิน:คอร์เดียไรต์,60:40) เตรียมในปริมาณ 40 กิโลกรัม เนื่องจากมีค่าการดูดซึมน้ำที่น้อยกว่า มีค่าความแข็งแรงหลังเผาสูงกว่า และผลจากองค์ประกอบทางเฟส พบ 2 เฟสหลัก คือ คอร์เดียไรต์ บีตาสปอคูมิน และสปีเนลเพียงเล็กน้อย ทดลองขึ้นรูปผลิตภัณฑ์รูปทรงหม้อต้มอาหาร (สูง 20 เซนติเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางยาว 25 เซนติเมตร) และเผาที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียสและ 1280 องศาเซลเซียส ดังภาพที่ 4.22 พบว่าเมื่อเผาผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิ 1280 องศาเซลเซียส เกิดการยุบตัวของผลิตภัณฑ์ แต่เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส ผลิตภัณฑ์สามารถคงรูปได้ ดังนั้น จึงต้องลดอุณหภูมิในการเผาชิ้นงานตัวอย่างและเผาที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส ซึ่งก็จะมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวต่ำ คือ  $2.602 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$  ดังตารางที่ 4.6 และเนื้อดินสูตรนี้มีส่วนผสมของดินดำประมาณ 18 เปอร์เซ็นต์ ทำให้เนื้อดินมีความเหนียวพอ สามารถนำมาขึ้นรูปด้วยวิธีการหล่อแบบได้ จึงได้นำเนื้อดินสูตรนี้ ทดลองเตรียมเป็นชิ้นงานตัวอย่าง



เผาที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส



เผาที่อุณหภูมิ 1280 องศาเซลเซียส

ภาพที่ 4.22 ชิ้นงานตัวอย่าง รูปหม้อ สูตรเนื้อดิน CS6 เผาที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส และ 1280 องศาเซลเซียส



#### 4.5 ผลการทดลองใช้งานจริงบนเตาแก๊ส

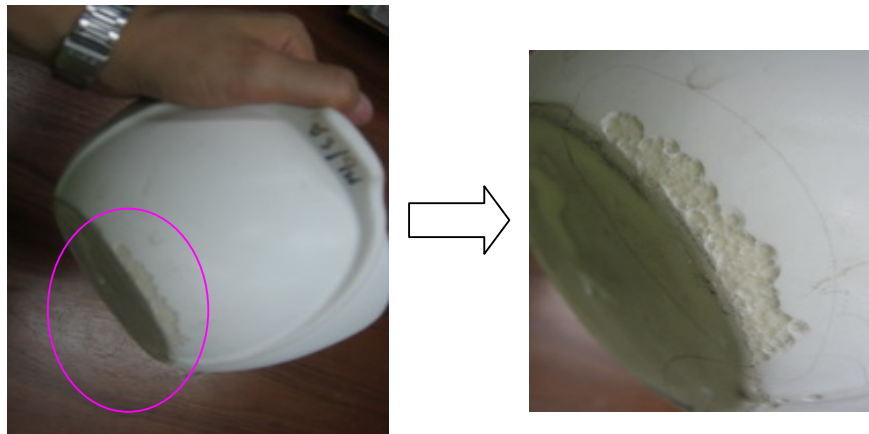
จากผลการทดลองขึ้นรูปชิ้นงานตัวอย่างผลิตภัณฑ์ต้นแบบ สูตรเนื้อดิน CS6 ชิ้นงานสามารถรูปได้ที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส จึงได้ขึ้นรูปชิ้นงานตัวอย่างรูปหม้อ ด้วยสูตรเนื้อดินดังกล่าว แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส นำชิ้นงานมาเคลือบสูตรเคลือบที่มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ ที่เตรียมจาก เพทาไลต์ ทัลค์ ดินขาว แคลเซียมคาร์บอเนต และ ควอตซ์ เคลือบชิ้นงานตัวอย่างนำไปเผาที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส ผิวเคลือบมีขาว ผิวกึ่งมันกึ่งด้าน ดังภาพที่ 4.23 นำไปทดลองใช้งานจริงบนเตาแก๊ส (ตามวิธีการทดสอบ บทที่ 3 หัวข้อที่ 3.4.10) ดังภาพที่ 4.24 ผลการทดสอบ มีผิวของเคลือบบางส่วนหลุดออกมาจากผิวชิ้นงานตัวอย่าง หลังจากการทดสอบครั้งที่ 7 ดังภาพที่ 4.25 เมื่อทำการทดลองซ้ำ 10 ครั้ง ไม่พบรอยแตกร้าว แต่พบการหลุดร่อนของเคลือบที่เพิ่มมากขึ้น อาจเนื่องมาจากชิ้นงานมีค่าการดูดซึมน้ำสูงมากกว่า 10 เปอร์เซ็นต์ ทำให้ผิวยังมีการดูดซึมน้ำได้แล้วเก็บกักน้ำไว้ภายในชิ้นงานจนเกิดการความเครียดสะสม ส่งผลให้เนื้อดินและเคลือบเข้ากันไม่ได้จึงได้หลุดร่อนออกจากกัน และได้นำเนื้อดินที่เตรียมได้หาค่าการนำความร้อน พบว่า ค่าการนำความร้อนต่ำที่ 1.39 วัตต์ต่อเมตรต่อเคลวิน ถึงแม้ว่าค่าการนำความร้อนนั้นจะมีค่าต่ำ แต่เมื่อนำชิ้นงานตัวอย่างตั้งไฟโดยใช้เวลาเพียงประมาณ 3-5 นาที น้ำก็เดือดที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 4.23 ทดลองเคลือบชิ้นงานตัวอย่าง เผาที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 4.24 การทดสอบการใช้งานจริงบนเตาแก๊ส



ภาพที่ 4.25 ฝิวเคลือบร้อนออกจากฝิวชิ้นงานตัวอย่างหลังทดสอบการใช้งานจริง

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองเตรียมเนื้อดินที่มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ ผลของการเตรียมเนื้อดินสปอดูมิน/คอร์เดียไรต์ โดยใช้วัตถุดิบคือ บีตาสปอดูมิน ทัลค์ ดินคำผง และอะลูมินา บดผสมแบบเปียกในหม้อบดอะลูมินา และขึ้นรูปด้วยวิธีการหล่อแบบ นำไปเผาฟีนิก และวิเคราะห์สมบัติต่างๆ หลังเผา จากนั้นคัดเลือกสูตรเนื้อดินที่ดีที่สุด เตรียมเป็นชิ้นทดสอบและขึ้นงานตัวอย่างผลิตภัณฑ์ดินแบบหม้อต้มอาหาร นำไปทดลองเคลือบและทดสอบการใช้งานจริงบนเตาแก๊ส ตรวจสอบการร้าวตัวของเคลือบด้วยเมทิลลินบลู สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. คอร์เดียไรต์และสปอดูมินเป็นวัสดุที่มีจุดสุกตัวสูงกว่า 1310 องศาเซลเซียส โดยมีค่าการดูดซึมน้ำสูงกว่า 10 เปอร์เซ็นต์ แต่เมื่อนำวัสดุสองชนิดนี้มาผสมกัน ได้เป็นวัสดุเชิงประกอบสปอดูมิน/คอร์เดียไรต์ จะทำให้จุดสุกตัวลดต่ำลง มีค่าการดูดซึมน้ำลดลง และไม่พบสารประกอบระหว่างวัสดุทั้งสองชนิดนอกจากสปีเนลที่เป็นเฟสรองเพียงเล็กน้อยอันเกิดจากอุณหภูมิการเผาที่ยังไม่สูงพอที่จะให้เกิดปฏิกิริยาเป็นคอร์เดียไรต์อย่างสมบูรณ์

2. อัตราส่วนผสมระหว่างบีตาสปอดูมินและคอร์เดียไรต์ ที่บีตาสปอดูมิน 60 เปอร์เซ็นต์ และคอร์เดียไรต์ 40 เปอร์เซ็นต์ (CS6) เมื่อเผาที่ 1280 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ด้วยอัตราการขึ้นอุณหภูมิที่ 3 องศาเซลเซียสต่อนาที มีค่าการหดตัวรวมหลังเผา 10.40 เปอร์เซ็นต์ ค่าการดูดซึมน้ำต่ำ 0.03 เปอร์เซ็นต์ มีความแข็งแรงสูงถึง 52.07 เมกะพาสคัล ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ  $2.154 \times 10^{-6}$  ต่อองศาเซลเซียส ค่าการนำความร้อน 1.03 วัตต์ต่อเมตรเคลวิน สามารถทนทานการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างเฉียบพลันได้สูงถึง 400 องศาเซลเซียส

3. การทดลองขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ดินแบบหม้อต้ม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางยาว 25 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร ด้วยวิธีการหล่อแบบสูตรอัตราส่วนผสมระหว่างบีตาสปอดูมินและคอร์เดียไรต์ ที่บีตาสปอดูมิน 60 เปอร์เซ็นต์ และคอร์เดียไรต์ 40 เปอร์เซ็นต์ (CS6) เมื่อเผาที่ 1280 องศาเซลเซียส ชิ้นงานยุบตัว ไม่สามารถผลิตเป็นชิ้นงานได้

4. การทดลองลดอุณหภูมิเผาผลิตภัณฑ์ดินแบบหม้อต้มลงที่ 1250 องศาเซลเซียส ได้ชิ้นงานดินแบบที่สมบูรณ์ และทดลองการเคลือบด้วยเคลือบที่มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ เพื่อทดสอบการใช้งานเบื้องต้น สามารถตั้งไฟบนเตาแก๊สได้โดยไม่เกิดการแตกร้าว แต่ยังไม่เหมาะสมกับการผลิตจริงเนื่องจากมีค่าการดูดซึมน้ำสูงถึง 12.23 เปอร์เซ็นต์ และมีค่าความแข็งแรงต่ำเพียง 37.49 เมกะพาสคัล

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. จากผลการทดลองที่มีการเกิดเฟสร่วมสปีเนลในปริมาณเล็กน้อยทำให้ชิ้นงานตัวอย่างมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนสูง จึงควรมีการศึกษาเพื่อลดปริมาณของสปีเนลด้วยการเพิ่มปริมาณซิลิกา หรือลดขนาดอนุภาคของวัตถุดิบลงให้เกิดปฏิกิริยาเป็นคอร์เดี่ยวไรต์ได้สมบูรณ์มากขึ้น

2. ถ้าจะนำเนื้อดินไปผลิตในเชิงพาณิชย์จะต้องทำการทดลองเพิ่มเติม ให้วัสดุมีช่วงอุณหภูมิการเผาที่กว้าง อยู่ระหว่าง 30-50 องศาเซลเซียส ชิ้นงานหลังเผาไม่มีการเปลี่ยนรูปร่าง ไม่ยุบตัว โดยอาจเพิ่มเฟสของมุลไลต์ลงไปเพื่อช่วยเพิ่มความแข็งแรงของ โครงสร้างผลิตภัณฑ์ได้

## รายการอ้างอิง

- (1) Norton, F. H. Fine Ceramics Technology and Application. New York: McGraw-Hill, 1970.
- (2) Fishwick, J. H. Applications of Lithium in Ceramics. Cahners Books. Massachusetts: A Division of Cahners Publishing, 1974.
- (3) Yalamaç, E., Akkurt, S. Additive and intensive grinding effects on the synthesis of cordierite. Ceramics International 32 (2006): 825-832.
- (4) Yamuna, A., Johnson, R., Mahajan, Y. R., Lalithambika, M. Kaolin-based cordierite for pollution control. Journal of the European Ceramic Society 24 (2004): 65-73.
- (5) วิกีพีเดีย สารานุกรมเสรี. เซรามิก [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://th.wikipedia.org/wiki/เซรามิก> [2554, กันยายน 2]
- (6) ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ. ประเภทของเซรามิก [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: [http://www.mne.eng.psu.ac.th/staff/lek\\_files/ceramic/u1-4.htm](http://www.mne.eng.psu.ac.th/staff/lek_files/ceramic/u1-4.htm) [2554, กันยายน 2]
- (7) Wikipedia the free encyclopedia. Earthenware [Online]. Available from: <http://en.wikipedia.org/wiki/Earthenware> [2011, September 2]
- (8) ปรีดา พิมพ์ขาวขำ. เซรามิกส์. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.
- (9) Strawberry Earthenware Tableware ceramics soup Bowl dishes 41939 [Online]. Available from: <http://www.kaboodle.com/reviews/strawberry-earthenware-tableware-ceramics-soup-bowl-dishes-41938> [2011, September 3]
- (10) Nguereco. How to Make Pottery - How to Make Ceramics - Types of Clays 91 [Online]. Available from: <http://ngureco.hubpages.com/hub/How-to-Make-Pottery-How-to-Make-Ceramics-Types-of-Clays> [2011, September 3]
- (11) บริษัทคอมพาวด์เคลย์ จำกัด. ดินเอิร์ทเทิร์นแวร์เนื้อแดง (Terra Cotta Body) [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: [http://www.compoundclay.net/Earthenware\\_thai.html](http://www.compoundclay.net/Earthenware_thai.html) [2554, กันยายน 2]
- (12) Wikipedia the free encyclopedia. Stoneware [Online]. Available from: <http://en.wikipedia.org/wiki/Stoneware> [2011, September 2]
- (13) Rodgers, C. S. Stoneware Tableware [Online]. 2011. Available from: <http://www.claireshenkroddgers.com/tableware> [2011, September 2]

- (14) Wikipedia the free encyclopedia. Porcelain [Online]. 2011. Available from: <http://en.wikipedia.org/wiki/Porcelain> [2011, September 2]
- (15) Tita Porcelain Tableware Co., L. porcelain dinner set [Online]. 2011. Available from: [http://www.bombayharbor.com/Product/32425/Porcelain\\_Dinner\\_Set.html](http://www.bombayharbor.com/Product/32425/Porcelain_Dinner_Set.html) [2011, September 2]
- (16) ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. โบนไชน่า (Bone China) คืออะไร [ออนไลน์]. 2550. แหล่งที่มา: [http://www.mtec.or.th/index.php?option=com\\_content&task=view&id=135&Itemid=178](http://www.mtec.or.th/index.php?option=com_content&task=view&id=135&Itemid=178) [2554, กันยายน 2]
- (17) PLATINUM, R. White Bone China [Online]. Available from: <http://www.englishchinashop.com/noritake/rochelleplatinum.asp>[2011,September 2]
- (18) Data Table for: Industrial Ceramics: Traditional Ceramics: Porcelain [Online]. 2009. Available from: <http://www.matbase.com/material/ceramics/traditional/porcelain/properties> [2011, September 1]
- (19) WBB Fuchs. Prepares ceramic bodies [Online]. 2011. Available from: [http://www.wbbminerals.net/publications/pdf/WBB\\_Fuchs\\_English.pdf](http://www.wbbminerals.net/publications/pdf/WBB_Fuchs_English.pdf) [2011,September 2]
- (20) คชินท์ สายอินทวงศ์. สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน คุณสมบัติที่สำคัญที่หลายคนมองข้าม [ออนไลน์]. 2550. แหล่งที่มา: [http://www.thaiceramicsociety.com/ch\\_heat.php](http://www.thaiceramicsociety.com/ch_heat.php) [2554, กันยายน 2]
- (21) The pottery work. CASSEROLES [Online]. Available from: [http://www.flamewarepottery.com/portfolio/flamewarePortfolio.php?image=TS\\_Portfolio\\_14](http://www.flamewarepottery.com/portfolio/flamewarePortfolio.php?image=TS_Portfolio_14) [2011, September 3]
- (22) Faria, M., Alberto, C., Constantino, Amando. Ceramic flameware with interior and exterior non-stick coating [Online]. 2007. Available from: <https://data.epo.org/publication-server/getpdf.jsp?pn=1774885&ki=A2&cc=EP> [2011, August 9]
- (23) The pottery work. Flameware [Online]. 2011. Available from: <http://www.flamewarepottery.com/> [2011, September 3]
- (24) เอมอร คชเสนี. เตาไมโครเวฟอันตรายหรือไม่ [ออนไลน์]. 2011. แหล่งที่มา: <http://www.samuthprakarn.com/เตาไมโครเวฟ-อันตรายหรือไม่/> [2554, กันยายน 3]
- (25) บริษัทตลาดบีทูบี ดอทคอม. เตาแก๊สอินฟราเรด [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.taradb2b.com/th/keyword?w=stove&typ=Product> [2554, กันยายน 5]

- (26) Shui, D. F., Tarot. the oven and feng shui [Online]. 2011. Available from: <http://www.fortunetellergypsy.yolasite.com/diannes-psychic-blog.php> [2011, September 5]
- (27) บริษัท แสงชัยมิเตอร์ จำกัด. KONSTANZ THS-2590 เตาไฟฟ้า [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.sangchaimeter.com/product/content/hot-plate-ths-2590> [2554, กันยายน 5]
- (28) Tagines Reviews. Hot Deals 2-3/5 qt Ceramic Flame Top Tagine With Lid, Azure Blue Tagines Reviews [Online]. 2011. Available from: <http://www.taginesreviews.tk/%e2%96%ba%e2%96%ba%e2%96%bahot-deals-2-35-qt-ceramic-flame-top-tagine-with-lid-azure-blue/> [2011, September 2]
- (29) หม้อจุ่ม [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.bloggang.com/viewdiary.php?id=mai-mee&month=09-2008&date=29&group=3&gblog=17> [2554, กันยายน 3 ]
- (30) BlissHome. Tagine Black Medium [Online]. Available from: <http://www.blisshome.co.uk/nigella-lawsons-flameware-tagine-cooking-dish-medium-black-prod1473> [2011, September 3]
- (31) Gouda, A., Abdel-Marouf, S., Aboud, G., Ibrahim, D. M. Ceramic cooking ware. Key Engineering Materials 206-213 (2001): 1791-1794.
- (32) Round casserole [Online]. 2011. Available from: <http://www.arc-international-cookware.com/en/products/elegance/round-casserole> [2011, September 3]
- (33) Tulyaganov, D. U., Agathopoulos, S., Fernandes, H. R., Ferreira, J. M. F. Synthesis of lithium aluminosilicate glass and glass-ceramics from spodumene material. Ceramics International 30 (2004): 1023-1030.
- (34) Glass-Ceramic Cooking Pot (5 liter) [Online]. Available from: <http://www.purenature24.com/shop/a1785/glass-ceramic-cooking-pot-5-liter.html> [2011, September 3]
- (35) Shi, C. G., Low, I. M. Use of spodumene for liquid-phase-sintering of aluminium titanate. Materials Letters 36 (1998): 118-122.
- (36) Manurung, P., Low, I. M., O'Connor, B. H., Kennedy, S. Effect of [beta]-spodumene on the phase development in an alumina/aluminium-titanate system. Materials Research Bulletin 40 (2005): 2047-2055.

- (37) Haigh, M. Spodumene: A source of the versatile element lithium. American Ceramic Society Bulletin 76 (1997): 75-78.
- (38) (Clinopyroxene) Spodumene:  $\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$ . (Courtesy of OCW.) [Online]. Available from: <http://ocw.mit.edu/ans7870/12/12.108/f04/imagegallery/lab3/lab3-02.html> [2011, September 3]
- (39) Tulyaganov, D. U., Agathopoulos, S., Fernandes, H. R., Ferreira, J. M. F., Fabrichnaya, O. Influence of  $\text{Li}_2\text{O}$  Doping on Non-Isothermal Evolution of Phases in K–Na-Containing Aluminosilicate Matrix. Journal of the American Ceramic Society 89 (2006): 292-297.
- (40) Tumanov, S. G., Shvaiko, V. P. Lithia porcelain. Glass and Ceramics 13 (1956): 17-23.
- (41) Tulyaganov, D. U., Agathopoulos, S., Fernandes, H. R., Ferreira, J. M. F. Influence of lithium oxide as auxiliary flux on the properties of triaxial porcelain bodies. Journal of the European Ceramic Society 26 (2006): 1131-1139.
- (42) Awaad, M., Mörtel, H., Naga, S. M. Densification, mechanical and microstructure properties of  $\beta$ -spodumene - Alumina composites. Journal of Materials Science: Materials in Electronics 16 (2005): 377-381.
- (43) Shi, C. G., Low, I. M. Effect of Spodumene Additions on the Sintering and Densification of Aluminum Titanate. Materials Research Bulletin 33 (1998): 817-824.
- (44) Yamuna, A., Devanarayanan, S., Lalithambika, M. Mullite -  $\beta$ -Spodumene Composites from Aluminosilicates. Journal of the American Ceramic Society 84 (2001): 1703-1709.
- (45) Geology.com. Cordierite - Mineral Properties and Uses [Online]. 2005. Available from: <http://geology.com/minerals/cordierite.shtml> [2011, September 2]
- (46) Costa Oliveira, F. A., Cruz Fernandes, J. Mechanical and thermal behaviour of cordierite-zirconia composites. Ceramics International 28 (2002): 79-91.
- (47) วิไลรัตน์ โกสุพรรณ. การขึ้นรูปและลักษณะสมบัติของเซรามิกวงฝังคอร์เดียไรต์จากของเสียในอุตสาหกรรมวัสดุทนไฟ. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2552.
- (48) แม้น อมรสิทธิ์, และสมชัย อัครทิวา. วัสดุวิศวกรรม. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์ท็อป, 2549.



- (49) จิราพร บุญพอ. ผลของสารเติมแต่งต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติของวัสดุเชิงประกอบอะลูมินาและทังสเตนคาร์ไบด์. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2553.
- (50) บวร วรเจษฎารมย์. ผลของสารเติมแต่งต่อสมบัติของแก้วซิลิกาจากเถ้าแกลบที่เตรียมโดยการเผาผนึก. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2553.
- (51) Roy, R., Agrawal, D. K., Mckinstry, H. A. Very low thermal expansion coefficient materials. Annu.Rev.Mater.Sci., 19 (1989): 59-81.
- (52) Kopeliovich, D. Thermal properties of ceramics [Online]. Available from: [http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=thermal\\_properties\\_of\\_ceramics&DokuWiki=6b272bbcf2cf74daeac48c9cd6127197#thermal\\_shock\\_resistance](http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=thermal_properties_of_ceramics&DokuWiki=6b272bbcf2cf74daeac48c9cd6127197#thermal_shock_resistance) [2011, September 3]
- (53) Fishwick, J. H., Ven Der Beck, R. R., Talley, R. W. Low Thermal Expansion Compositions in the Systems Spodumene-Kaolin and Petalite-Kaolin. American Ceramic Society Bulletin 43 (1964): 832-835.
- (54) Shyu, J. J., Chuang, F. R. Densification and phase development of spodumene-cordierite glass powder mixtures. Journal of the American Ceramic Society 80 (1997): 3273-3277.
- (55) Karkhanavala, M. D., Hummel, F. A. Reactions in the System  $\text{Li}_2\text{O-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  : I, The Cordierite-Spodumene Join. Journal of The American Ceramic Society 36 (1953): 393-397.
- (56) Ordan'yan, S. S., Andreev, K. P., Stepanenko, E. K. Structure of the  $\beta$ -spodumene-cordierite system. Russian Journal of Applied Chemistry 71 (1998): 564-566.
- (57) ASTM C 326 - 03, Standard Test Method for Drying and Firing Shrinkages of Whiteware Clays, United State: ASTM, 2008.
- (58) ASTM C 373 - 88 (Reapproved 2006), Standard Test Method for Water Absorption, Bulk Density, Apparent Porosity, and Apparent Specific Gravity of Fired Whiteware Products, United State: ASTM, 2008.
- (59) ASTM C 674 - 88 (Reapproved 2006), Standard Test Methods for Flexural Properties of Ceramic Whiteware Materials, United State: ASTM, 2008.

- (60) ASTM C 372 - 94 (Reapproved 2007), Standard Test Method for Linear Thermal Expansion of Porcelain Enamel and Glaze Frits and Frits Ceramic Whiteware Products by the Dilatometer Method, United State: ASTM, 2008.
- (61) ASTM C 554 - 93 (Reapproved 2006), Crazing Resistance of Fired Glazed Ceramic Whitewares by a Thermal Shock Method, United State: ASTM, 2008.
- (62) Hsu, P. High temperature non-stick cookware [Online]. 2001. Available from: <http://www.freepatentsonline.com/6261985.pdf> [2011, August 9]

ภาคผนวก

## ภาคผนวก ก

## สมบัติต่างๆ ของชิ้นงานหลังเผา

ตารางที่ ก.1 การหาค่าของชิ้นงานก่อนเผาและหลังเผาที่อุณหภูมิ 1220 1250 1280 และ 1310 องศาเซลเซียส

สูตร (Formula)	การหาค่าก่อนเผา (เปอร์เซ็นต์)	การหาค่าหลังเผา (เปอร์เซ็นต์)			
		1220 °C	1250 °C	1280 °C	1310 °C
CS0	2.89 ± 0.35	6.04 ± 0.50	6.09 ± 0.25	5.98 ± 0.05	4.52 ± 0.22
CS1	2.91 ± 0.13	8.92 ± 0.32	10.23 ± 0.33	13.74 ± 0.63	8.75 ± 0.56
CS2	1.71 ± 0.19	9.31 ± 0.43	11.55 ± 1.05	14.44 ± 1.48	9.43 ± 1.16
CS3	2.39 ± 0.25	10.62 ± 0.47	11.71 ± 0.76	15.48 ± 1.02	9.78 ± 0.82
CS4	0.86 ± 0.47	6.26 ± 0.96	7.16 ± 0.63	13.22 ± 0.08	*
CS5	0.93 ± 0.19	6.82 ± 0.20	8.17 ± 0.72	11.57 ± 0.54	12.75 ± 0.39
CS6	0.26 ± 0.10	4.43 ± 0.11	5.19 ± 0.43	10.40 ± 0.37	10.74 ± 0.32
CS7	0.27 ± 0.30	5.28 ± 0.09	6.73 ± 0.56	10.86 ± 0.48	11.77 ± 0.18
CS8	0.18 ± 0.02	2.31 ± 0.52	2.48 ± 0.33	4.45 ± 0.45	5.44 ± 0.32
CS9	0.17 ± 0.01	1.80 ± 0.24	2.09 ± 0.28	2.45 ± 0.35	2.81 ± 0.02
CS10	0.08 ± 0.01	2.56 ± 0.55	2.81 ± 0.02	3.30 ± 0.14	4.84 ± 0.23

ตารางที่ ก.2 ความแข็งแรงหลังเผาของชิ้นงานที่อุณหภูมิ 1220 1250 1280 และ 1310 องศาเซลเซียส

สูตร	ความแข็งแรงหลังเผา (MPa)		
	1250 °C	1280 °C	1310 °C
CS0	19.58 ± 4.53	17.81 ± 7.66	11.50 ± 5.18
CS1	19.14 ± 5.02	18.20 ± 6.79	35.00 ± 4.83
CS2	9.83 ± 1.54	9.91 ± 2.53	2.83 ± 4.78
CS3	23.70 ± 8.87	22.25 ± 9.28	7.61 ± 4.16
CS4	43.04 ± 3.40	61.99 ± 4.16	*
CS5	50.54 ± 4.50	75.11 ± 2.58	49.58 ± 6.07
CS6	37.49 ± 3.25	52.07 ± 2.56	35.04 ± 2.52
CS7	39.51 ± 4.68	45.00 ± 6.50	28.58 ± 5.88
CS8	32.59 ± 3.25	34.15 ± 3.23	25.22 ± 3.92
CS9	36.13 ± 2.58	38.59 ± 4.48	33.78 ± 9.42
CS10	28.98 ± 2.53	31.16 ± 6.59	33.65 ± 4.55

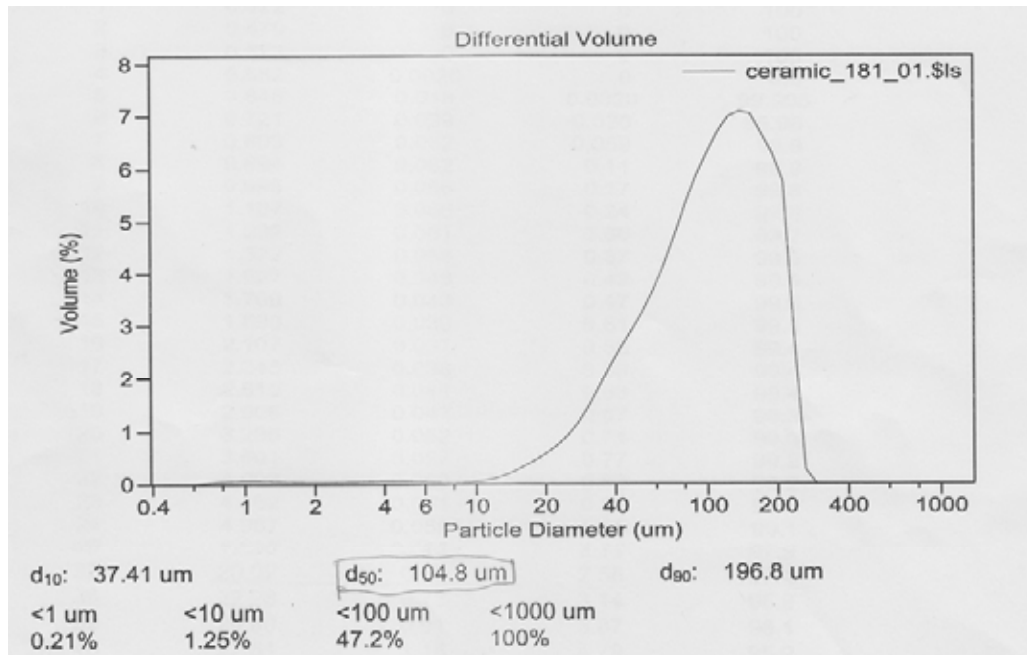
ตารางที่ ก.3 การดูดซึมน้ำของชิ้นงานหลังเผาที่อุณหภูมิ 1220 1250 1280 และ 1310 องศาเซลเซียส

สูตร (Formula)	การดูดซึมน้ำ (%)			
	1220 °C	1250 °C	1280 °C	1310 °C
CS0	18.71 ± 0.24	12.24 ± 0.27	10.42 ± 0.82	9.32 ± 0.11
CS1	12.09 ± 0.44	11.04 ± 0.33	8.96 ± 0.87	3.37 ± 0.48
CS2	5.68 ± 0.80	0.71 ± 0.53	0.96 ± 0.59	1.02 ± 0.70
CS3	3.66 ± 0.85	0.29 ± 0.45	0.27 ± 0.46	1.13 ± 0.14
CS4	15.99 ± 0.97	16.35 ± 0.27	0.27 ± 0.20	*
CS5	16.44 ± 0.27	16.57 ± 0.23	0.03 ± 0.34	1.41 ± 0.25
CS6	13.26 ± 0.37	12.23 ± 0.35	0.03 ± 0.03	0.73 ± 0.23
CS7	14.94 ± 0.05	13.88 ± 0.37	1.10 ± 0.14	1.51 ± 0.13
CS8	17.63 ± 0.19	17.57 ± 0.45	14.70 ± 0.63	10.70 ± 0.15
CS9	20.47 ± 0.50	20.55 ± 0.27	19.45 ± 0.25	18.31 ± 0.27
CS10	23.56 ± 0.27	19.57 ± 0.37	18.76 ± 0.43	14.21 ± 0.35

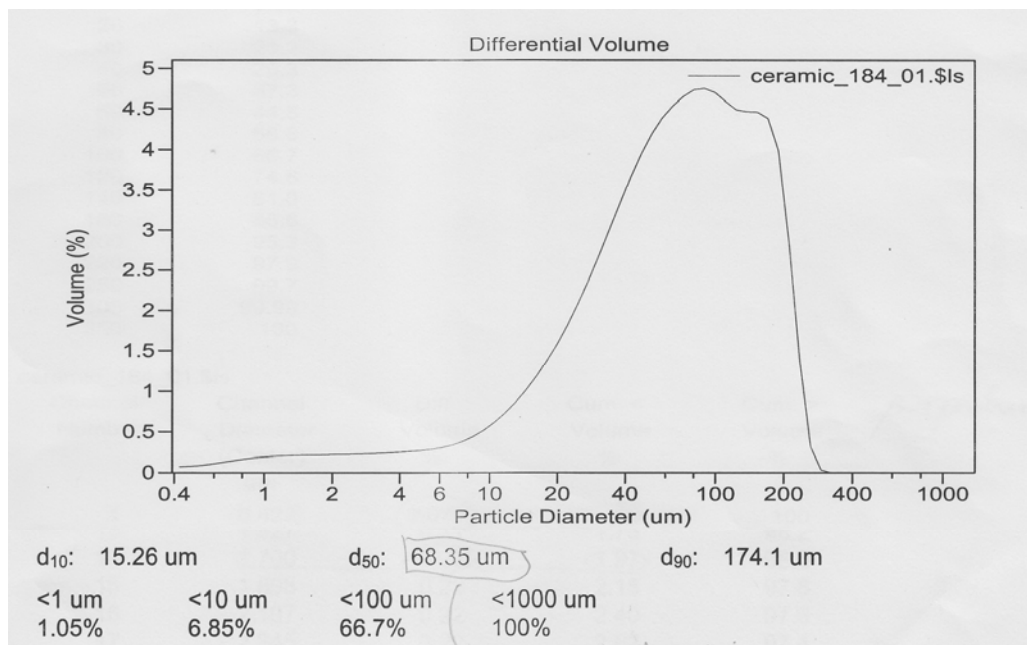
ตารางที่ ก.4 ความหนาแน่นของชิ้นงานหลังเผาที่อุณหภูมิ 1220 1250 1280 และ 1310 องศาเซลเซียส

สูตร (Formula)	ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )			
	1220 °C	1250 °C	1280 °C	1310 °C
CS0	1.79 ± 0.07	1.80 ± 0.01	1.83 ± 0.01	1.87 ± 0.01
CS1	1.93 ± 0.04	1.93 ± 0.03	1.95 ± 0.01	2.06 ± 0.02
CS2	2.09 ± 0.03	2.18 ± 0.04	2.19 ± 0.03	2.10 ± 0.05
CS3	2.06 ± 0.02	2.15 ± 0.07	2.18 ± 0.07	2.00 ± 0.08
CS4	1.79 ± 0.03	1.93 ± 0.05	2.23 ± 0.04	*
CS5	1.77 ± 0.07	2.06 ± 0.01	2.24 ± 0.05	2.25 ± 0.08
CS6	1.82 ± 0.05	1.98 ± 0.08	2.15 ± 0.01	2.23 ± 0.05
CS7	1.79 ± 0.03	1.82 ± 0.05	2.21 ± 0.01	2.19 ± 0.03
CS8	1.69 ± 0.05	1.69 ± 0.02	1.79 ± 0.02	1.85 ± 0.02
CS9	1.60 ± 0.03	1.60 ± 0.03	1.64 ± 0.01	1.67 ± 0.01
CS10	1.59 ± 0.04	1.61 ± 0.02	1.64 ± 0.01	1.77 ± 0.03

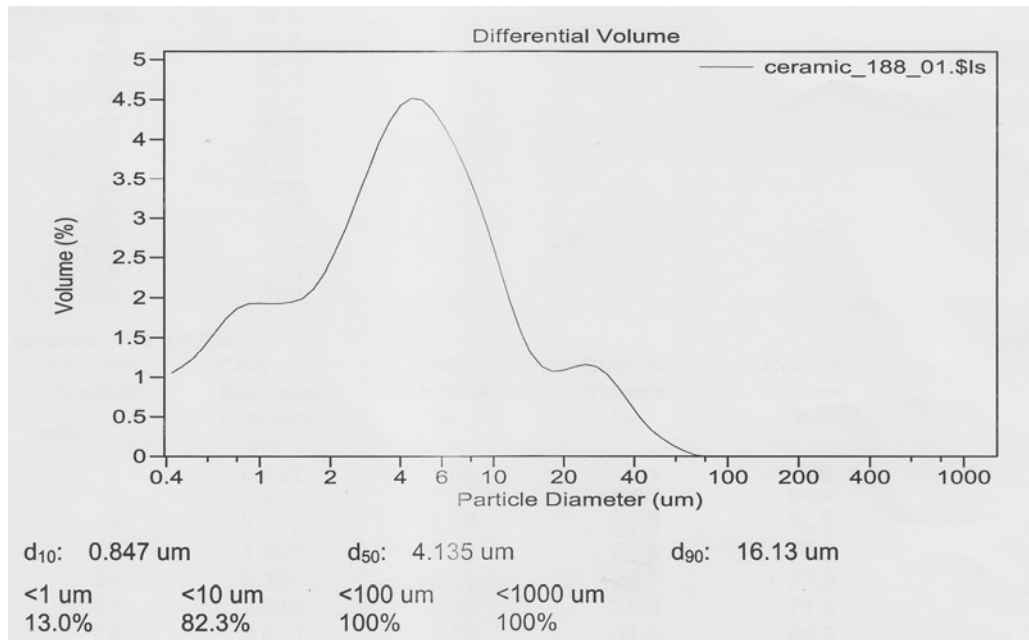
ภาคผนวก ข  
การกระจายขนาดของอนุภาคของวัสดุดิบ



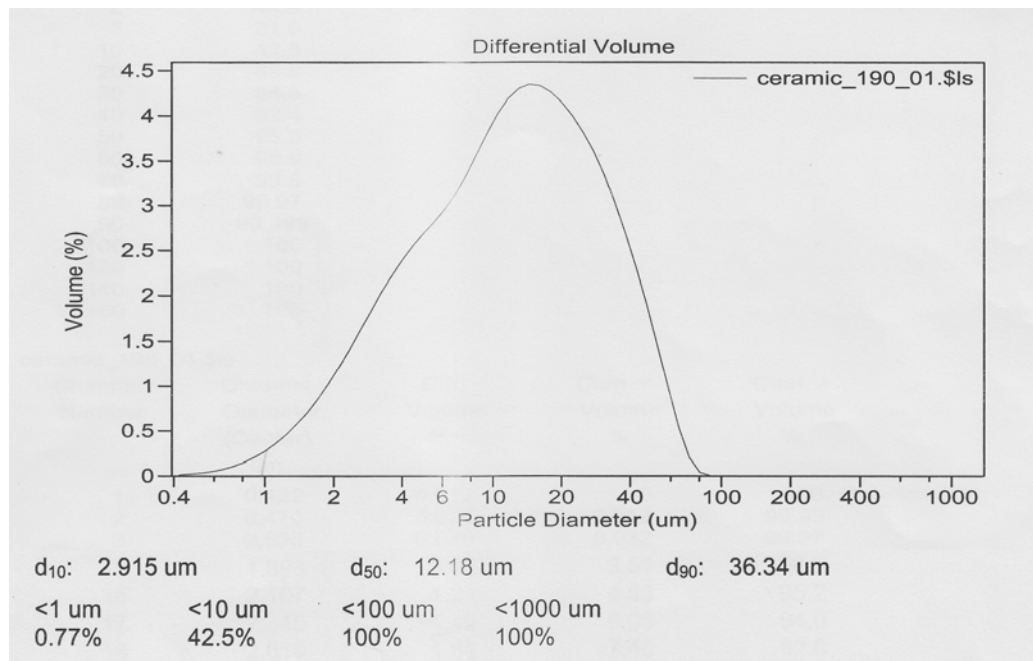
ภาพที่ ข.1 การกระจายขนาดของอนุภาคสปอดูมินก่อนเผา (alpha spodumene)



ภาพที่ ข.2 การกระจายขนาดอนุภาคของสปอดูมินหลังเผา

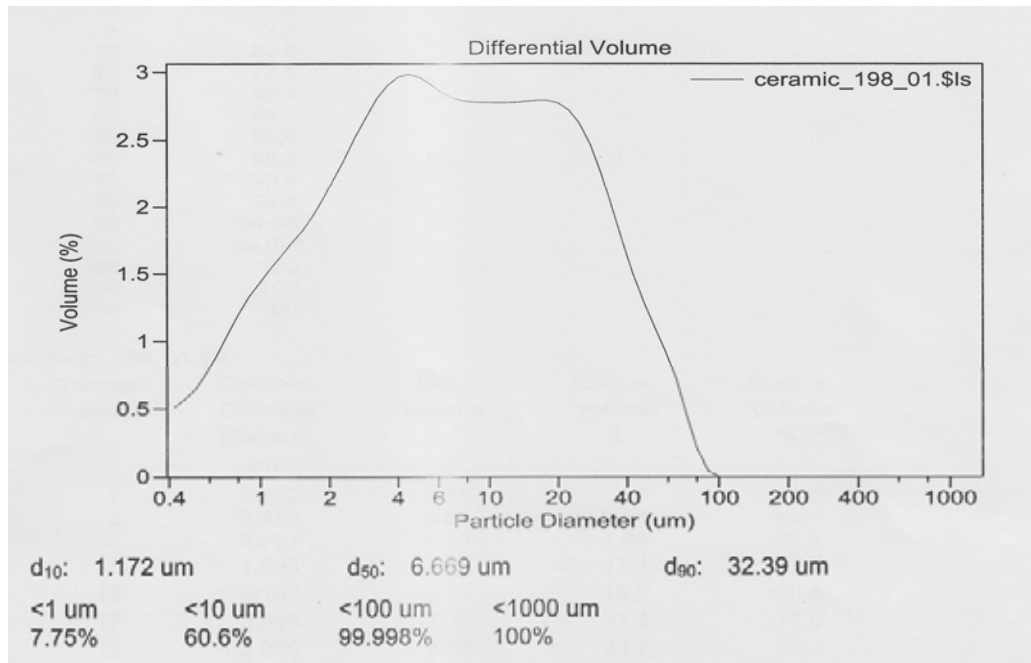


ภาพที่ ข.3 การกระจายขนาดอนุภาคของอะลูมินา A31



ภาพที่ ข.4 การกระจายขนาดอนุภาคของทัลค์

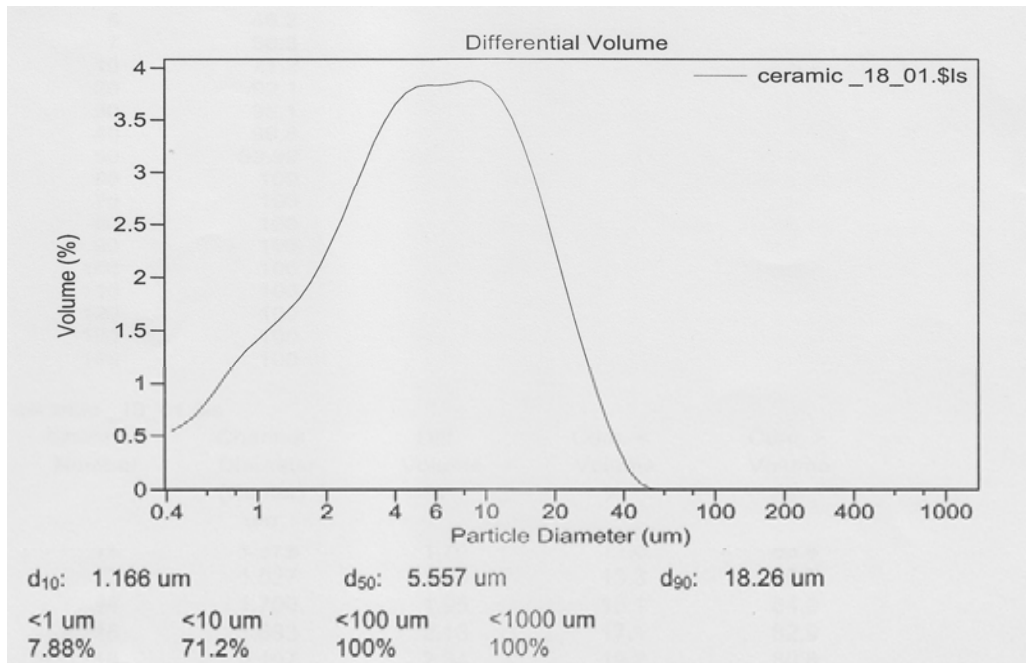




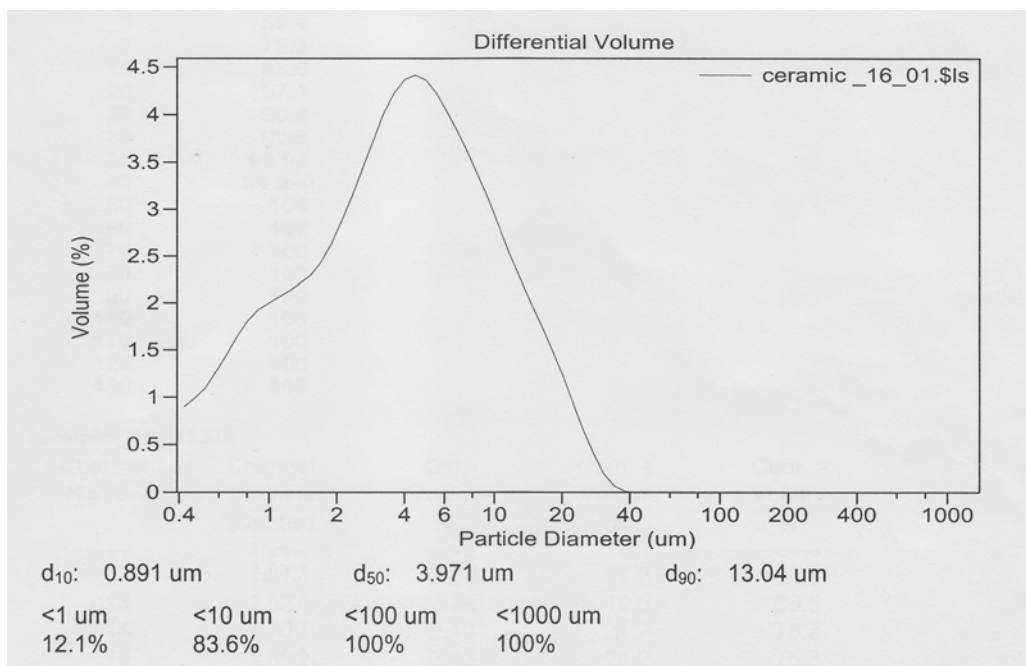
ภาพที่ ข.5 การกระจายขนาดอนุภาคของดินดำผง (RAA)

## ภาคผนวก ค

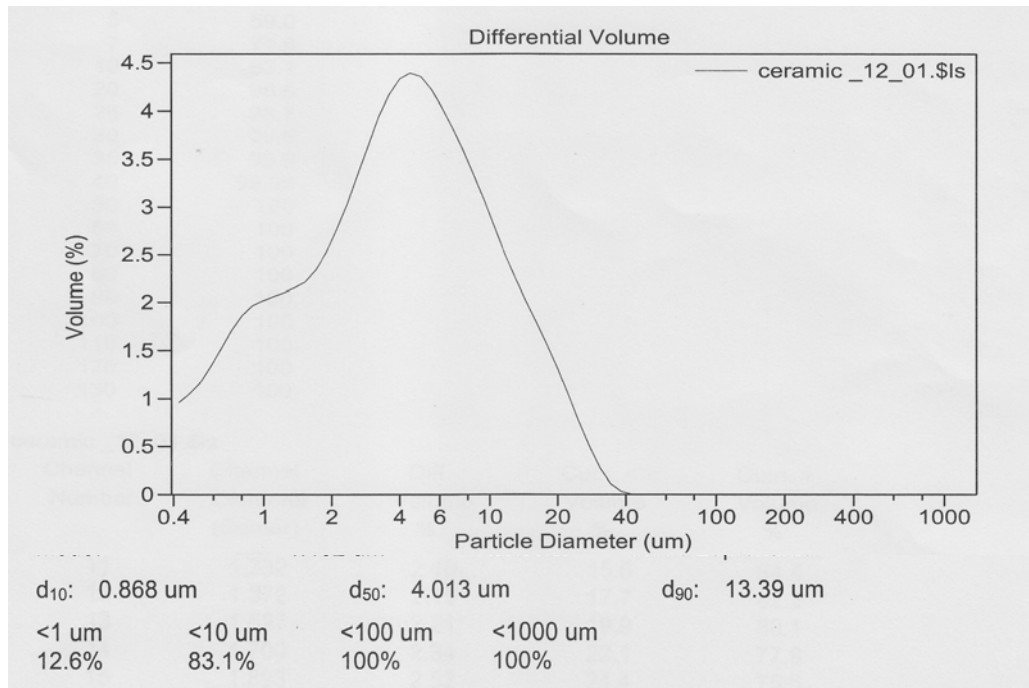
## การกระจายขนาดของอนุภาคของเนื้อดินสปอตูมิน/คอร์เตียไรต์หลังบด



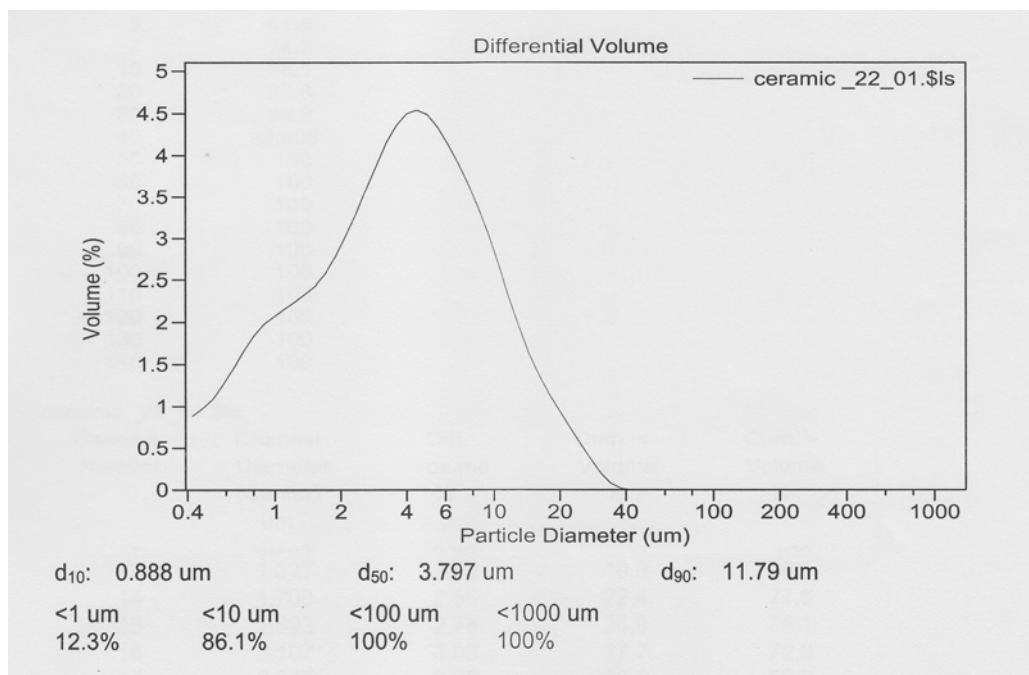
ภาพที่ ค.1 การกระจายขนาดอนุภาคหลังบด 24 ชั่วโมง ของสูตร CS0 (C:100, S:0)



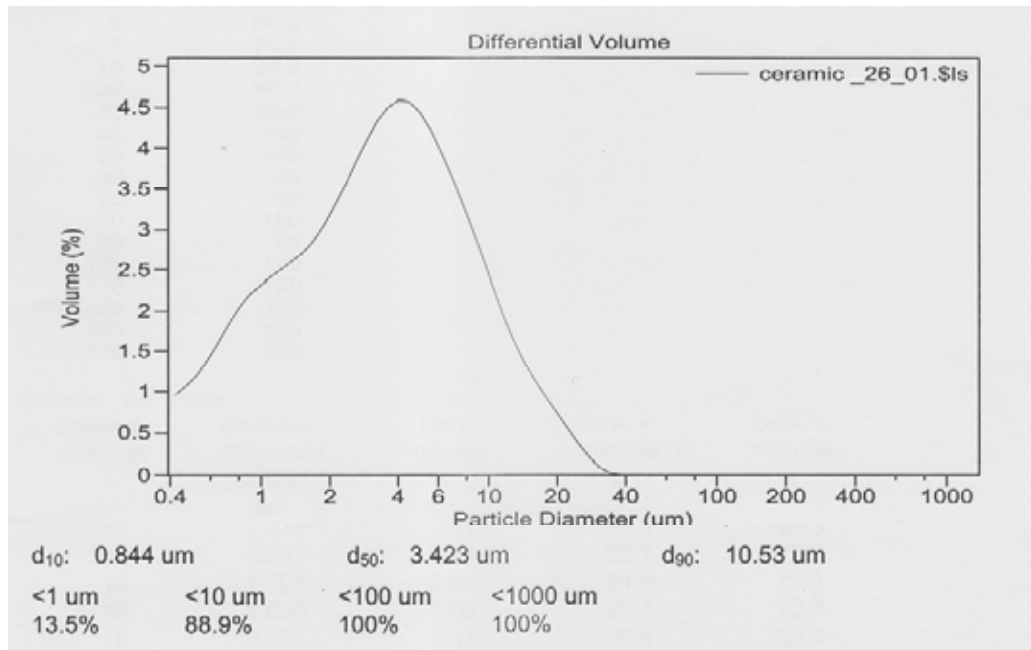
ภาพที่ ค.2 การกระจายขนาดอนุภาคหลังบด 24 ชั่วโมง ของสูตร CS1 (C:90, S:10)



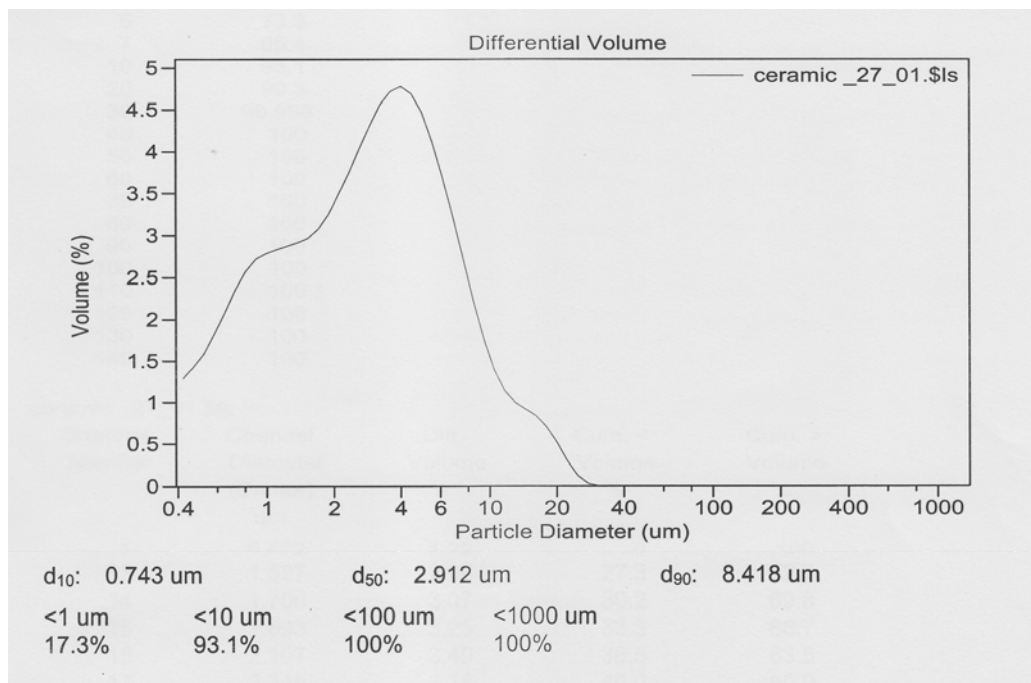
ภาพที่ ค.3 การกระจายขนาดอนุภาคหลังบด 24 ชั่วโมง ของสูตร CS2 (C:80, S:20)



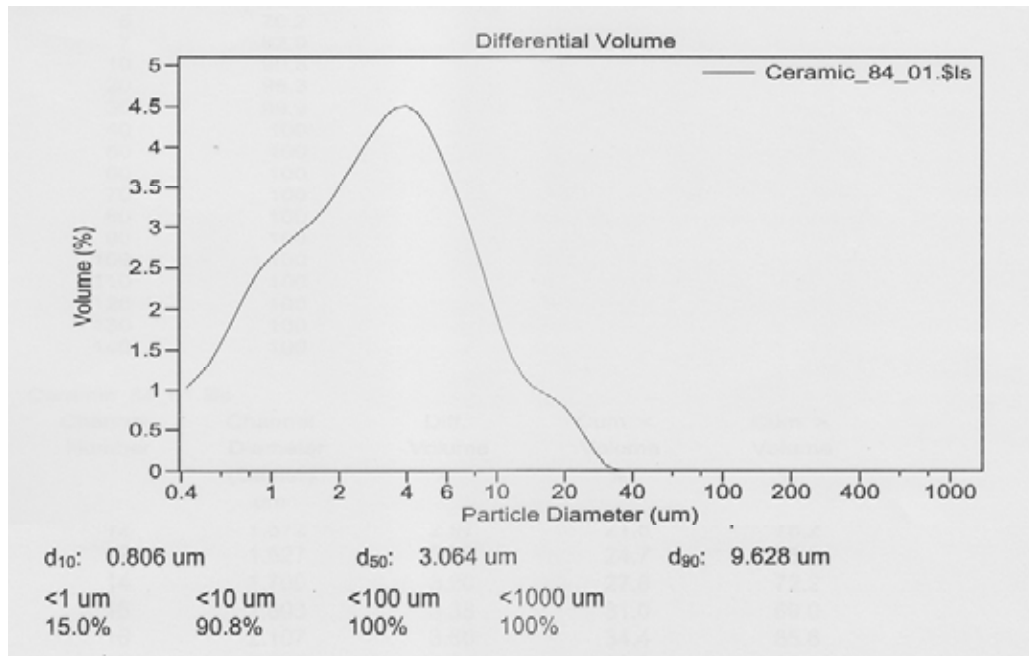
ภาพที่ ค.4 การกระจายขนาดอนุภาคหลังบด 24 ชั่วโมง ของสูตร CS3 (C:70, S:30)



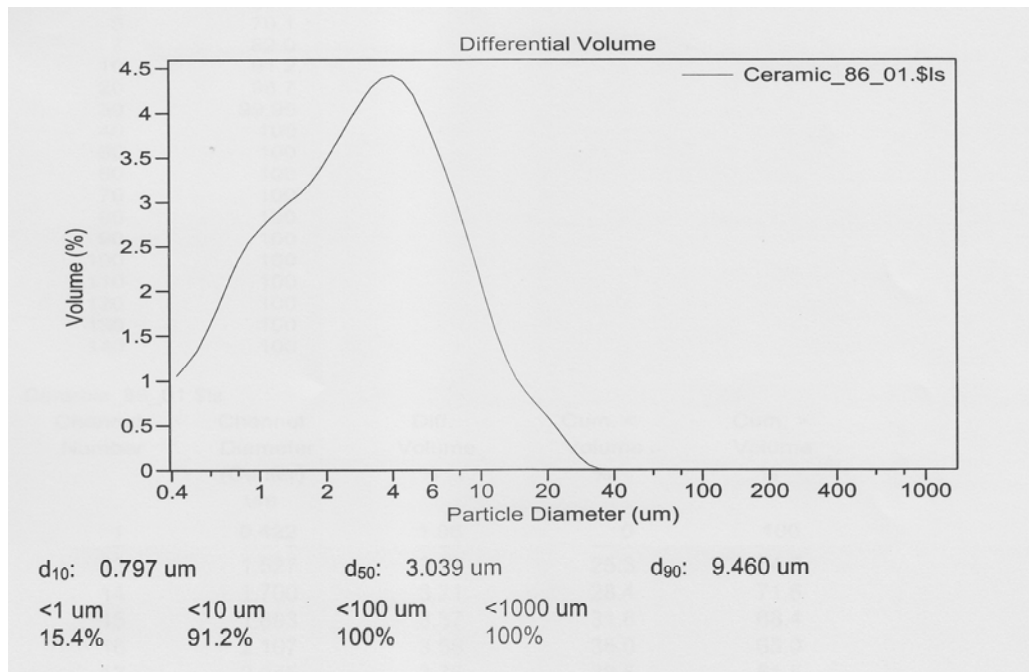
ภาพที่ ค.5 การกระจายขนาดอนุภาคหลังบด 24 ชั่วโมง ของสูตร CS5 (C:50, S:50)



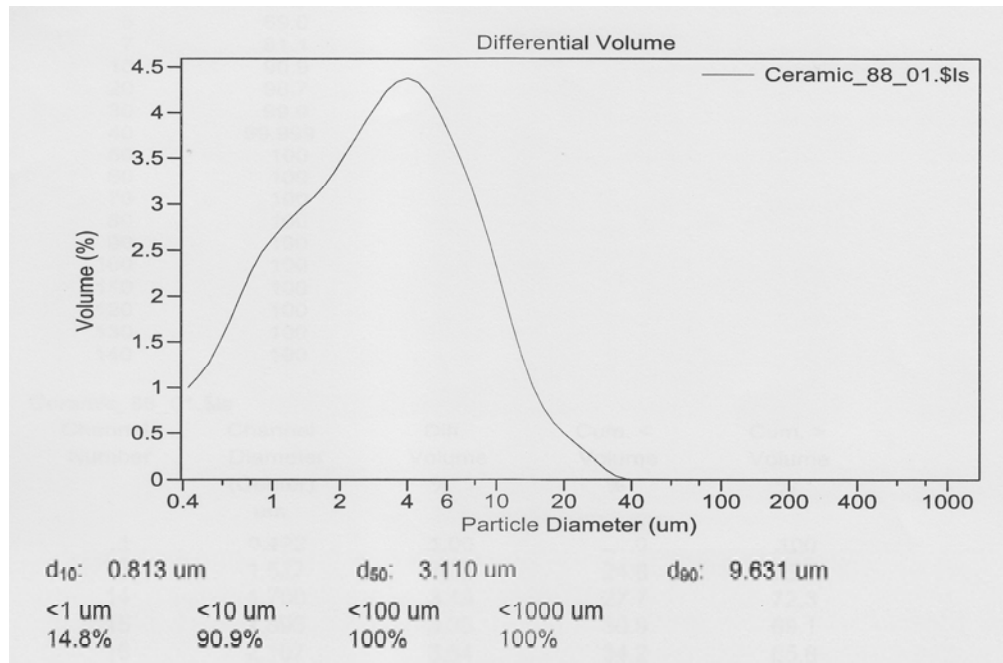
ภาพที่ ค.6 การกระจายขนาดอนุภาคหลังบด 24 ชั่วโมง ของสูตร CS6 (C:40, S:60)



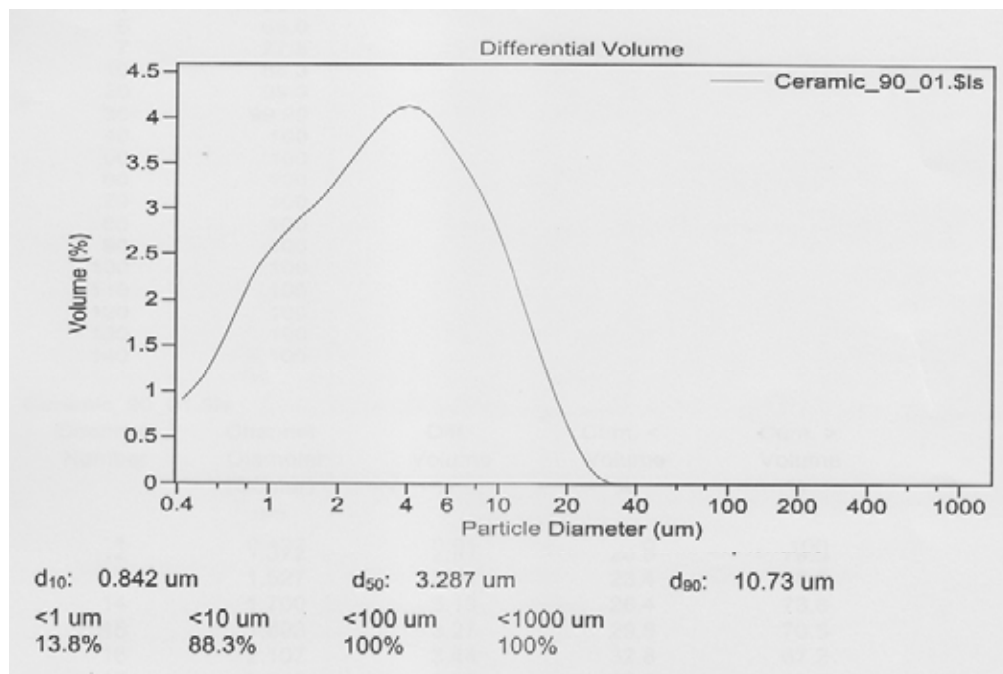
ภาพที่ ค.7 การกระจายขนาดอนุภาคหลังบด 24 ชั่วโมง ของสูตร CS7 (C:30, S:70)



ภาพที่ ค.8 การกระจายขนาดอนุภาคหลังบด 24 ชั่วโมง ของสูตร CS8 (C:20, S:80)



ภาพที่ ค.9 การกระจายขนาดอนุภาคหลังบด 24 ชั่วโมง ของสูตร CS9 (C:10, S:90)



ภาพที่ ค.10 การกระจายขนาดอนุภาคหลังบด 24 ชั่วโมง ของสูตร CS10 (C:0, S:100)

## ภาคผนวก ง

## การคำนวณค่าองค์ประกอบทางเคมีของสูตรเนื้อดิน CS0-CS10

ตารางที่ ง.1 จำนวนองค์ประกอบทางเคมีสูตร CS0-CS10 จากค่าองค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ

องค์ประกอบ เคมี (%)	CS0	CS1	CS2	CS3	CS4	CS5	CS6	CS7	CS8	CS9	CS10
Li <sub>2</sub> O	-	0.77	1.53	2.29	3.05	3.80	4.56	5.32	6.08	6.84	7.6
MgO	12.97	11.67	10.38	9.09	7.80	6.50	5.21	3.92	2.63	1.33	-
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	29.27	28.99	28.71	28.44	28.16	27.88	27.61	27.33	27.05	26.78	26.50
SiO <sub>2</sub>	47.49	49.19	50.89	52.53	54.30	56.00	57.71	59.40	61.10	62.80	64.50
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.58	0.53	0.48	0.43	0.38	0.33	0.28	0.23	0.17	0.12	0.07
Na <sub>2</sub> O	0.47	0.44	0.41	0.37	0.34	0.31	0.28	0.25	0.21	0.18	0.15
K <sub>2</sub> O	0.76	0.69	0.62	0.56	0.49	0.42	0.35	0.28	0.22	0.15	0.08
CaO	0.94	0.85	0.76	0.67	0.58	0.50	0.41	0.32	0.23	0.14	0.05
TiO <sub>2</sub>	0.32	0.28	0.25	0.22	0.19	0.16	0.13	0.10	0.07	0.04	0.01
MnO <sub>2</sub>	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
LOI	6.82	6.16	5.50	4.83	4.17	3.51	2.85	2.19	1.52	0.86	0.20
จำนวนรวม	99.63	99.59	99.55	99.51	99.47	99.43	99.39	99.34	99.30	99.26	99.22

ตารางที่ ง.2 จำนวนองค์ประกอบทางเคมีสูตร CS0-CS10 จากค่าองค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ

องค์ประกอบ เคมี (%)	CS0	CS1	CS2	CS3	CS4	CS5	CS6	CS7	CS8	CS9	CS10
Li <sub>2</sub> O	-	0.82	1.62	2.41	3.20	3.97	4.73	5.48	6.22	6.95	7.68
MgO	13.97	12.49	11.04	9.60	8.18	6.78	5.40	4.03	2.68	1.35	-
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	31.53	31.03	30.53	30.03	29.55	29.07	28.60	28.13	27.67	27.21	26.76
SiO <sub>2</sub>	51.17	52.65	54.11	55.55	56.98	58.38	59.77	61.14	62.49	63.82	65.14
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.63	0.57	0.51	0.45	0.40	0.34	0.29	0.23	0.18	0.12	0.07
Na <sub>2</sub> O	0.51	0.47	0.43	0.40	0.36	0.32	0.29	0.25	0.22	0.18	0.15
K <sub>2</sub> O	0.82	0.74	0.66	0.59	0.51	0.44	0.36	0.29	0.22	0.15	0.08
CaO	1.01	0.91	0.81	0.71	0.61	0.52	0.42	0.33	0.23	0.14	0.05
TiO <sub>2</sub>	0.34	0.30	0.27	0.24	0.20	0.17	0.14	0.10	0.07	0.04	0.01
MnO <sub>2</sub>	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
LOI	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
จำนวนรวม	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

หมายเหตุ ตัดค่า LOI ออก คิดรวมเป็นร้อยละ



ตารางที่ ง.3 จำนวนค่าองค์ประกอบทางเคมีสูตร CS0-CS10

สูตร	ค่าทางทฤษฎี				จำนวน				
	Li <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Li <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	LOI
CS0	-	13.80	34.80	51.40	-	12.97	29.27	47.49	6.82
CS1	0.81	12.42	34.06	52.72	0.77	11.67	28.99	49.19	6.16
CS2	1.61	11.04	33.32	54.03	1.53	10.38	28.71	50.89	5.50
CS3	2.42	9.66	32.58	55.35	2.29	9.09	28.44	52.60	4.83
CS4	3.22	8.28	31.84	56.66	3.05	7.80	28.16	54.30	4.17
CS5	4.03	6.90	31.10	57.98	3.80	6.50	27.88	56.00	3.51
CS6	4.83	5.52	30.35	59.29	4.56	5.21	27.61	57.70	2.85
CS7	5.64	4.14	29.61	60.61	5.32	3.92	27.33	59.40	2.19
CS8	6.44	2.76	28.87	61.92	6.08	2.63	27.05	61.10	1.52
CS9	7.25	1.38	28.13	63.24	6.84	1.33	26.78	62.80	0.86
CS10	8.06	-	27.39	64.55	7.60	-	26.50	64.50	0.20

ตารางที่ ง.4 จำนวนค่าองค์ประกอบทางเคมีสูตร CS0-CS10

สูตร	ค่าทางทฤษฎี				จำนวน (ไม่รวมค่า LOD) ปรับค่าเป็นร้อยละ			
	Li <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Li <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>
CS0	-	13.80	34.80	51.40	-	13.97	31.53	51.17
CS1	0.81	12.42	34.06	52.72	0.82	12.49	31.03	52.65
CS2	1.61	11.04	33.32	54.03	1.62	11.04	30.53	54.11
CS3	2.42	9.66	32.58	55.35	2.41	9.60	30.03	55.55
CS4	3.22	8.28	31.84	56.66	3.20	8.18	29.55	56.98
CS5	4.03	6.90	31.10	57.98	3.97	6.78	29.07	58.38
CS6	4.83	5.52	30.35	59.29	4.73	5.40	28.60	59.77
CS7	5.64	4.14	29.61	60.61	5.48	4.03	28.13	61.14
CS8	6.44	2.76	28.87	61.92	6.22	2.68	27.67	62.49
CS9	7.25	1.38	28.13	63.24	6.95	1.35	27.21	63.82
CS10	8.06	-	27.39	64.55	7.68	-	26.76	65.14

### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวปราณี จันทร์ลา เกิดวันที่ 24 มิถุนายน พ.ศ. 2522 ที่จังหวัดสระบุรี สำเร็จการศึกษา ระดับปริญญาตรี หลักสูตรวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง เดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2547 เข้าทำงานตำแหน่งนักวิทยาศาสตร์ระดับปฏิบัติการ ที่กรมวิทยาศาสตร์บริการ จนถึงปัจจุบัน เดือนกันยายน พ.ศ. 2549 และเข้าศึกษาต่อใน หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีเซรามิก ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2551 และสำเร็จการศึกษาเดือน ตุลาคม พ.ศ. 2554

การนำเสนอผลงานทางวิชาการระดับนานาชาติแบบ Oral presentation เรื่อง **“Fabrication of Cordierite/Spodumene Composite by Slip Casting for Stove Top Ceramic Cookware”** ในการประชุมทางวิชาการ *3<sup>rd</sup> International Congress on Ceramics (ICC3)* ระหว่างวันที่ 14-18 พฤศจิกายน 2553 จัดโดย The Ceramic Society of Japan ณ เมืองโอซากา ประเทศญี่ปุ่น

การนำเสนอผลงานทางวิชาการระดับนานาชาติแบบ Oral presentation เรื่อง **“Fabrication of High Thermal Shock Resistance Spodumene/Cordierite Ceramic Composite for Cookware”** ในการประชุมทางวิชาการ *Pure and Applied Chemistry International Conference 2011 (PACCON2011)* ระหว่างวันที่ 5-7 มกราคม 2554 จัดโดย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ณ โรงแรมมิราเคิลแกรนด์ กรุงเทพฯ และได้รับการตีพิมพ์ผลงานแบบ Proceeding