

ผลของโซเดียมคาร์บอเนตต่อการเกิดควาบขาวและสมบัติของเนื้อดินปั้นราชบุรีหลังเผา



นายอดิศักดิ์ ถิ่นพลอย

ศูนย์วิทยพัทยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

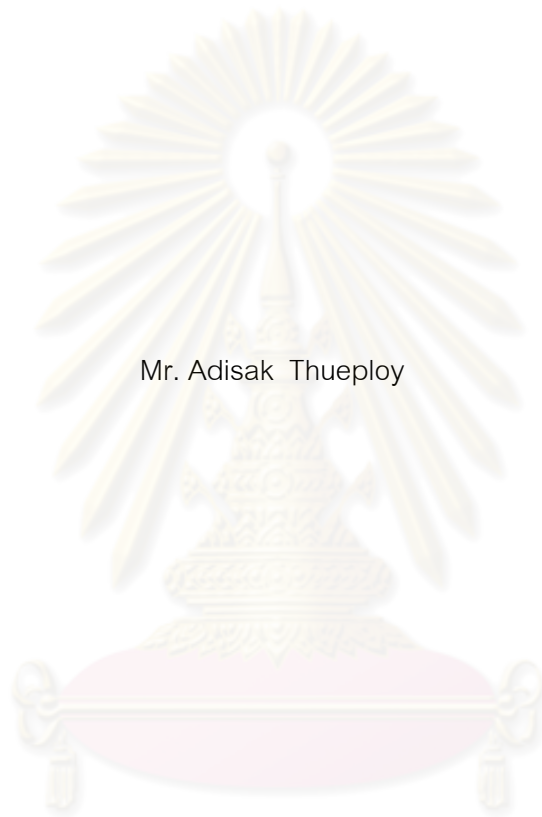
สาขาวิชาเทคโนโลยีเซรามิก ภาควิชาวัสดุศาสตร์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECTS OF SODIUM CARBONATE ON SCUMMING AND FIRING PROPERTIES OF  
RATCHABURI POTTERY CLAY



Mr. Adisak Thueploy

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
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 2009

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ผลของไซโตไคน์บอเนตต่อการเกิดคราบขาวและสมบัติ  
ของเนื้อดินปั้นราชบุรีหลังเผา

โดย

นายอดิศักดิ์ ถิ่นพลอย

สาขาวิชา

เทคโนโลยีเซรามิก

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนากร วาสนาเพียรพงศ์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

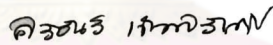
อาจารย์ ดร.สิริพรรณ นิลไพรัช

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต



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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



..... ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริฉวี เจียมศิริเลิศ)



..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนากร วาสนาเพียรพงศ์)



..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม  
(อาจารย์ ดร.สิริพรรณ นิลไพรัช)



..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดนัย อารยพงษ์)



..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ดร.นิรุติ หวังหมูกกลาง)

อดิศักดิ์ ถือพลอย : ผลของโซเดียมคาร์บอเนตต่อการเกิดคราบขาวและสมบัติของเนื้อดินปั้น  
ราชบุรีหลังเผา. (EFFECTS OF SODIUM CARBONATE ON SCUMMING AND FIRING  
PROPERTIES OF RATCHABURI POTTERY CLAY) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก:  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนากร วาสนาเพียรพงศ์, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม:  
อาจารย์ ดร.สิริพรรณ นิลโพธิ์, 70 หน้า.

เครื่องปั้นดินเผาเอิร์ธเทิร์นแวร์ราชบุรีที่ใช้เนื้อดินปั้นเป็นเนื้อดินแดงเหนียวจากท้องที่ในเขตจังหวัด  
ราชบุรี และเผาที่อุณหภูมิประมาณ 850 - 1000 องศาเซลเซียส มักพบปัญหาการเกิดคราบเกลือสีขาวซึ่ง  
เป็นสารประกอบจำพวกแคลเซียมซัลเฟตที่ปนเปื้อนอยู่ในแหล่งดินในรูปของแร่ยิปซัม โดยสังเกตพบคราบขาว  
ได้ตั้งแต่ก่อนเผาและหลังการเผา แต่ในบางครั้งแม้จะไม่พบคราบขาวภายหลังการเผา แต่เมื่อเมื่อมีการใช้งาน  
ที่สัมผัสกับความเปียกชื้นเป็นเวลานาน เช่นกระถางปลูกต้นไม้ หรือเครื่องประดับสวอน เกลือแคลเซียมซัลเฟต  
ที่ปนเปื้อนอยู่ภายในเนื้อดิน สามารถละลายน้ำได้ สารละลายเกลือดังกล่าวจะแพร่มาที่พื้นผิว แล้วเมื่อน้ำ  
ระเหยแห้งจะเกิดการตกผลึก มีลักษณะเป็นเกล็ดขนาดเล็กสีขาวได้เช่นกัน แม้จะมีการรายงานและมีการใช้  
งานกันอย่างแพร่หลายว่าการเติมแบเรียมคาร์บอเนตจะช่วยลดปริมาณเกลือแคลเซียมซัลเฟต และลดปัญหา  
คราบขาวลงได้ แต่การเติมแบเรียมคาร์บอเนตในรูปของแข็งจะทำให้เกิดการกระจายตัวในเนื้อดินได้ยาก  
และต้องใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา จึงทำให้ผู้ประกอบการบางรายไม่ประสบความสำเร็จในการแก้ปัญหา  
คราบขาวดังกล่าว

งานวิจัยนี้จึงต้องการศึกษาการแก้ปัญหาโดยการเติมสารเติมแต่งได้แก่ โซเดียมคาร์บอเนต โซเดียม  
ฟอสเฟต และโซเดียมคลอไรด์ เปรียบเทียบกับแบเรียมคาร์บอเนตที่มีการใช้งานกันโดยทั่วไป โดยใช้สารเติม  
แต่งเหล่านี้ปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนักของดิน ละลายในน้ำกลั่นปริมาณร้อยละ 22 โดยน้ำหนักของดิน  
เปียก ผสมกับผงดินราชบุรี ทำการนวดผสม หมักไว้ 24 ชั่วโมง ทำการอัดขึ้นรูป อบแห้ง และทำการเผาที่  
อุณหภูมิ 850 900 และ 950 องศาเซลเซียส ทำการวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณของไอออนต่างๆ ของเนื้อดิน  
หลังการนวดผสมแล้วหมักไว้ และบริเวณผิวน้ำของตัวอย่างหลังการระเหยแห้ง รวมทั้งสมบัติหลังการเผา  
ความแข็งแรง การดูดซึมน้ำ การหดตัวและการวัดค่าสี พบว่าการเติมโซเดียมคาร์บอเนตจำนวนร้อยละ 1 โดย  
น้ำหนักของดิน สามารถลดปัญหาคราบขาวลงได้เช่นเดียวกับการเติมแบเรียมคาร์บอเนต อีกทั้งชิ้นงานหลัง  
เผาที่ 950 องศาเซลเซียส มีค่าการดูดซึมน้ำต่ำเพียง 12.22 เปอร์เซ็นต์ ค่าความแข็งแรง 32.53 เมกกะพาสคัล  
เมื่อเทียบกับการเติมแบเรียมคาร์บอเนต ซึ่งมีค่าการดูดซึมน้ำสูง 15.58 เปอร์เซ็นต์ ค่าความแข็งแรง 25.25  
เมกกะพาสคัล จึงทำให้การเติมโซเดียมคาร์บอเนตมีข้อดีมากกว่าการเติมแบเรียมคาร์บอเนต

ภาควิชา.....วัสดุศาสตร์.....ลายมือชื่อนิสิต.....  
สาขาวิชา.....เทคโนโลยีเซรามิก.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....  
ปีการศึกษา.....2552.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....

# # 5072547223 : MAJOR CERAMIC TECHNOLOGY

KEYWORDS: SCUMMING / RATCHABURI POTTERY CLAY / SODIUM CARBONATE

ADISAK THUEPLOY: EFFECTS OF SODIUM CARBONATE ON SCUMMING AND FIRING PROPERTIES OF RATCHABURI POTTERY CLAY. Thesis Advisor: Asistant Professor THANAKORN WASANAPIARNPONG, Ph.D., Thesis Co - Advisor: SIRIPHAN NILPAIRACH, Ph.D., 70 pp.

Ratchaburi earthenware pottery products made by using local red plastic clay in Ratchaburi province and fired at 850-1000 °C, always shows some blemishes which are caused by scumming on the surface. This scumming contains calcium sulfate, contaminated in the raw clay as gypsum form. The scumming, as white stain, can be noticed at clay body surface before and after firing. Although, in some cases, white stain is not seen after firing, it will reappear when the pottery products have been in serviced humid environment for a long time. Calcium sulfate is water-soluble. When the product absorbs moisture, calcium sulfate solution will permeate through capillary action to the surface and it is crystallized as a white fine powder. One suggested remedy to prevent this white stain is to use barium carbonate to reduce the white stain. However, it is difficult for barium carbonate, in solid form, to spread throughout the clay so that it takes a very long time to complete the reaction. Therefore this technique still does not satisfy the pottery producers.

This research aims to find the solution to the problems by using the alternative chemicals, nanely sodium carbonate, sodium phosphate and sodium chloride. Each of these chemicals was mixed in Ratchaburi clay at 1% by weight which was dissolved in distilled water by controlling the moisture content at 22% by wet weight. The mixtures were aged for 24 h and were then kneaded, formed, dried and fired at 850 °C, 900 °C, and 950 °C. The types and quantities of ions in mixed clay and of those which were deposited on the product surface were determined after drying. Firing properties which included, strength, water absorption, shrinkage, and color were also determined. It was found that adding sodium carbonate at 1% by weight, gave very much the same white stain areas. Result as the addition of barium carbonate in diminishing. Moreover, the sample after firing at 950 °C had lower water absorption (12.22%), higher strength (32.53 MPa) as compared to the clay added barium carbonate bodies which had higher water absorption (15.58%) and lower strength (25.25 MPa). Therefore, the addition of sodium carbonate to indigenous clay shows more promising results than the addition of barium carbonate.

Department : Materials Science

Student's Signature *Adisak*

Field of Study : Ceramic Technology

Advisor's Signature *TS*

Academic Year : 2009

Co-Advisor's Signature *Siriphan Nilpairach*

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ต้องขอขอบคุณ ความช่วยเหลือทั้งในด้านวิชาการ และการดำเนินการวิจัย จากบุคคลและหน่วยงานต่างๆ ดังนี้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนากร วาสนาเพียรพงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ สำหรับ คำแนะนำ แนวทางการดำเนินงานวิจัย และคำปรึกษา

อาจารย์ ดร.สิริพรรณ นิลไพรัช อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านสำหรับการตรวจแก้ไขรูปเล่ม และคำแนะนำ วิทยานิพนธ์ ทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้มีความสมบูรณ์มากขึ้น

ขอขอบพระคุณศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านปิโตรเลียม ปิโตรเคมี และวัสดุขั้นสูง ที่ สนับสนุนงบประมาณในการทำวิจัย

หน่วยปฏิบัติการวิจัยเซรามิกขั้นสูง ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย

สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คุณศรีไฉล ชุนทน คุณวีระ ชูกระชั้น คุณจุมพฏ วานิชยสัมพันธ์ คุณสุธารัตน์ อัครมณี กาญจน์ สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยสำหรับความช่วยเหลือในการทำ การทดลอง

สุดท้าย กราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่และครอบครัว ที่ดูแล อบรม สั่งสอนและให้ กำลังใจมาตลอด

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง .....	ฌ
สารบัญรูป .....	ญ
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....	1
1.2. วัตถุประสงค์.....	2
1.3. ขอบเขตของงานวิจัย .....	2
1.4. ผลที่คาดว่าจะได้รับ .....	2
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	3
2.1. เครื่องปั้นดินเผาเนื้อดินแดง .....	3
2.2. ดินเหนียวสำหรับผลิตภัณฑ์เนื้อดินแดง.....	3
2.3. คราบเกลือสีขาว.....	5
2.4. สีที่เกิดหลังการเผาเซรามิก.....	7
2.5. น้ำในผลิตภัณฑ์.....	8
2.6. กระบวนการอบแห้งของผลิตภัณฑ์.....	10
2.7. องค์ประกอบที่มีอิทธิพลต่อความเหนียวของดิน.....	14
2.8. การทดสอบความเหนียว .....	17
2.9. การขึ้นรูปด้วยมือ.....	19
2.10. การขึ้นรูปด้วยเครื่อง.....	19
2.10.1. การขึ้นรูปด้วยปั้นหมุน (Throwing).....	19
2.10.2. การขึ้นรูปด้วยใบมีด (Jiggering) .....	20
2.11. การขึ้นรูปด้วยการรีด (Extrusion).....	21
2.12. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	21
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	23
3.1. วัตถุประสงค์และสารเคมี .....	23

3.2. ขั้นตอนและวิธีการทดลอง.....	23
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผล .....	33
4.1. สมบัติของดินราชบุรี.....	33
4.2. องค์ประกอบของเกลือละลายน้ำได้ในดินเฉพาะบริเวณผิวหน้าของดินราชบุรี.....	33
4.3. องค์ประกอบทางเฟสของตัวอย่างก่อนและหลังเผา .....	36
4.4. โครงสร้างจุลภาค .....	40
4.5. ความแข็งแรง.....	43
4.6. การดูดซึมน้ำ .....	44
4.7. การหดตัว .....	45
4.8. การเปลี่ยนแปลงสี.....	46
4.9. การทดสอบความขึ้นด้วยเครื่อง Pfefferkorn plasticity test.....	48
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ .....	50
5.1. สรุปผลการวิจัย .....	50
5.2. ข้อเสนอแนะ.....	50
รายการอ้างอิง .....	51
ภาคผนวก.....	54
ภาคผนวก ก .....	55
ภาคผนวก ข .....	57
ภาคผนวก ค .....	63
ภาคผนวก ง.....	69
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	70



## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 การทดสอบองค์ประกอบของวัตถุบิที่ให้สีในดินแดง .....	5
ตารางที่ 2.2 สารประกอบซัลเฟอร์ที่ให้ออกไซด์ของโลหะเมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิสูง .....	7
ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของดินราชบุรี .....	33
ตารางที่ 4.2 ชนิดและปริมาณของไอออนต่างๆ ที่ละลายน้ำได้ในเนื้อดินและบริเวณผิว (ppm) และผลของการเติมเกลือชนิดต่างๆ .....	35
ตารางที่ 4.3 ค่าความแข็งแรงของชั้นงาน (MPa) .....	43
ตารางที่ 4.4 ค่าการดูดซึมน้ำของชั้นงาน (ร้อยละ) .....	44
ตารางที่ 4.5 ค่าการหดตัวของชั้นงาน (ร้อยละ) .....	45
ตารางที่ 4.6 ผลการเปลี่ยนแปลงสีของตัวอย่าง .....	47
ตารางที่ 4.7 ค่าสัมประสิทธิ์ความเหนียวของเนื้อดินปั้นความชื้นร้อยละ 22 .....	48
ตารางที่ 4.8 ค่าสัมประสิทธิ์ความเหนียวของเนื้อดินปั้นเปรียบเทียบความชื้น .....	48
ตารางที่ 4.9 ค่าการหดตัว (ร้อยละ) .....	49

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 เครื่องปั้นดินเผาเนื้อดินแดง.....	3
รูปที่ 2.2 รูปผลิตภัณฑ์ที่เกิดคราบขาว .....	6
รูปที่ 2.3 การเปลี่ยนแปลงเฟสของและความเสถียรของเหล็กออกไซด์ชนิดต่างๆ.....	8
รูปที่ 2.4 ลักษณะของน้ำและการจัดเรียงตัวของอนุภาคในการอบแห้งดิน .....	10
รูปที่ 2.5 ภาพจำลองกระบวนการระเหยแห้งของความชื้นของผลิตภัณฑ์ .....	11
รูปที่ 2.6 การเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นในเซรามิกระหว่างการเผา .....	11
รูปที่ 2.7 อัตราเร็วของกระบวนการระเหยแห้ง.....	12
รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วของกระบวนการระเหยแห้งต่อความชื้นในผลิตภัณฑ์ ใน อุดมคติ .....	14
รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่ปริมาณความชื้นต่างๆ .....	16
รูปที่ 2.10 เครื่อง Pfefferkorn plastic test และ อุปกรณ์สำหรับเตรียมชิ้นงานทดสอบ .....	18
รูปที่ 2.11 สเกลของเครื่อง Pfefferkorn plastic test.....	18
รูปที่ 2.12 การขึ้นรูปด้วยการกด .....	19
รูปที่ 2.13 การขึ้นรูปโดยอาศัยแป้นหมุน .....	20
รูปที่ 2.14 การขึ้นรูปด้วยใบมีด .....	20
รูปที่ 2.15 เครื่องรีดสำหรับการขึ้นรูป .....	21
รูปที่ 3.1 เครื่องบาร์ลอยด์ฟิลเตอร์.....	24
รูปที่ 3.2 เครื่อง Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS).....	25
รูปที่ 3.3 การนวดดินและการหมักดินในถุงพลาสติก .....	25
รูปที่ 3.4 แผ่นขึ้นงานกลมขนาด 35 มิลลิเมตร ผึ่งไว้ในอุณหภูมิห้อง.....	26
รูปที่ 3.5 การขึ้นรูปแห้งดินทดสอบ .....	27
รูปที่ 3.6 รูปแห้งดินหลังจากการรีดนำมาผึ่งไว้ในห้องทดลอง .....	28
รูปที่ 3.7 แผนภาพกระบวนการทดลอง .....	29
รูปที่ 3.8 การทดสอบความแข็งแรง Three point bending .....	30
รูปที่ 3.9 การเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบ.....	32
รูปที่ 3.10 การทำการทดสอบของเครื่อง Pfefferkorn plastic test .....	32
รูปที่ 4.1 กราฟการลึกลงของรังสีเอกซ์ของค้ประกอบเชิงแร่ของผงดินราชบุรี.....	36

รูปที่ 4.2 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของค้ประกอบเชิงแร่ของผิวด้านบนของดินราชบุรี.....	37
รูปที่ 4.3 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของค้ประกอบเชิงแร่ของผิวด้านล่างของดินราชบุรี.....	37
รูปที่ 4.4 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของค้ประกอบเชิงแร่ของผิวน้ำดินราชบุรีผสมแบเรียม คาร์บอเนต .....	38
รูปที่ 4.5 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของค้ประกอบเชิงแร่ของผิวน้ำดินราชบุรีผสมโซเดียม คาร์บอเนต .....	39
รูปที่ 4.6 ภาพขยายผิวด้านบนของดินราชบุรีหลังเผา 850 °C.....	40
รูปที่ 4.7 ผิวน้ำของดินราชบุรีผสมแบเรียมคาร์บอเนตหลังเผา 950 °C.....	41
รูปที่ 4.8 ผิวน้ำของดินราชบุรีผสมโซเดียมคาร์บอเนตหลังเผา 950 °C .....	42
รูปที่ 4.9 ค่าความแข็งแรงของชิ้นงานก่อนเผาและหลังเผา.....	43
รูปที่ 4.10 ปริมาณการดูดซึมน้ำของตัวอย่างหลังการเผา 850 900 และ 950 °C.....	44
รูปที่ 4.11 ปริมาณการหดตัวของหลังการเผา 850 900 และ 950 °C.....	45
รูปที่ 4.12 รูปการเปลี่ยนแปลงของสีเมื่อเติมสารเติมแต่งและเผาที่ 850 900 และ 950 °C.....	46

# บทที่ 1

## บทนำ

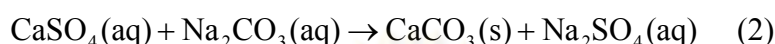
### 1.1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ผลิตภัณฑ์เครื่องปั้นดินเผาจำพวก กระถางต้นไม้ เครื่องประดับสวน อีฐู กระเบื้องเนื้อดิน แดงหมายถึงเซรามิกซึ่งเผาที่อุณหภูมิต่ำประมาณ 800-1000 องศาเซลเซียส สีหลังเผาเป็นสีแดง อีฐูตามธรรมชาติเนื่องจากมีปริมาณสนิมเหล็กในเนื้อดินเป็นผลิตภัณฑ์ที่สำคัญของจังหวัดราชบุรี โดยเนื้อดินปั้นเป็นเนื้อดินแดงจากท้องที่ในเขตจังหวัดราชบุรี ปัญหาที่มักพบในเนื้อดินปั้นที่เผาที่อุณหภูมิต่ำจากระบวนการผลิตโดยเฉพาะขั้นตอนการเตรียมเนื้อดินปั้นไม่ได้มีการล้างดินหรือควบคุมปริมาณสารเจือปนแต่อย่างใด มีเพียงการหมักนวดดินผสมทรายและปรับปริมาณความชื้นให้พอเหมาะ ก่อนนำไปขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เท่านั้น จะมีการเกิดคราบเกลือสีขาวเนื่องจากปริมาณเกลือแคลเซียมซัลเฟตที่ปนเปื้อนอยู่ในแหล่งดินในรูปของแรยิปซัม<sup>[1, 2]</sup> โดยสารละลายเกลือหรือและไอออนต่างๆ ที่เจือปนมาในเนื้อดินจะเกิดการตกผลึกหลังจากการระเหยของน้ำเรียงตามลำดับตามความสามารถในการละลาย และความเข้มข้นของเกลือและไอออนแต่ละตัว เกลือที่ตกผลึกช้ากว่าจะแพร่ผ่านเนื้อดินจากด้านในออกมาตกผลึกบริเวณผิวของเนื้อดินปั้น มีลักษณะเป็นเกล็ดขนาดเล็กสีขาว เมื่อเผาแล้วก็จะเป็นสีขาวทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้ไม่ได้คุณภาพตามที่ต้องการ เสียราคา ไม่เป็นที่ต้องการของตลาดซึ่งเป็นปัญหาที่พบได้บ่อย และสำคัญต่อการผลิตผลิตภัณฑ์เนื้อดินแดง

การแก้ไขปัญหาการเกิดคราบขาวด้วยแบเรียมคาร์บอเนต ( $\text{BaCO}_3$ ) โดยสัดส่วนของแบเรียมคาร์บอเนตที่ใช้ขึ้นกับความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาของคาร์บอเนตซึ่งจะใช้ปริมาณสองเท่าของซัลเฟตในทางทฤษฎีและความสามารถในการดูดซึมของอนุภาคดินเหนียว การทำปฏิกิริยาจะเกิดบริเวณผิวของอนุภาคแบเรียมคาร์บอเนตที่มีอนุภาคขนาดน้อยกว่า 1 ไมโครเมตร สามารถป้องกันการเกิดคราบขาวได้ดี<sup>[3-5]</sup> ก็สามารถช่วยลดปัญหาการเกิดคราบขาวพอสมควรด้วยปฏิกิริยาเคมีดังสมการ (1) ปัญหาในการใช้แบเรียมคาร์บอเนตเนื่องจากความสามารถในการละลายต่ำการกระจายตัวของแบเรียมคาร์บอเนตในเนื้อดินให้สม่ำเสมอ ทำได้ยากและแบเรียมคาร์บอเนตในท้องตลาดมีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคไม่สม่ำเสมอ<sup>[6]</sup> หากการนวดผสมไม่ดีพอก็จะพบรอยขาวที่เกิดจากผงแบเรียมคาร์บอเนตเอง และบางครั้งก็ไม่สามารถแก้ปัญหาคราบขาวจากเกลือให้หมดลงได้



สำหรับงานวิจัยนี้จะศึกษาปัจจัยการเกิดคราบขาวโดยการเติมโซเดียมคาร์บอเนต ในการแก้ปัญหาการเกิดคราบขาวในเนื้อดินปั้นราชบุรี เนื่องจากโซเดียมคาร์บอเนต มีความสามารถในการละลายน้ำได้ดีกว่าแบเรียมคาร์บอเนตซึ่งสามารถผสมเข้ากับเนื้อดินปั้นได้ง่าย โซเดียมคาร์บอเนตที่เติมลงไป จะทำปฏิกิริยากับเกลือแคลเซียมซัลเฟตที่มีอยู่ในดินวัตถุดิบได้สารประกอบแคลเซียมคาร์บอเนตที่ไม่ละลายน้ำ ดังสมการ (2)



อีกทั้งโซเดียมคาร์บอเนตมีจุดหลอมเหลวต่ำซึ่งช่วยลดอุณหภูมิของการเผา<sup>[7]</sup> การทดลองเริ่มต้นโดยการละลายโซเดียมคาร์บอเนต ด้วยน้ำกลั่นแล้วผสมกับดิน หลังจากทำการนวด อัดขึ้นรูป อบแห้ง และทำการเผาที่อุณหภูมิ 850 900 และ 950 องศาเซลเซียส ทำการวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณของไอออนต่างๆ บริเวณผิวด้านบนและในเนื้อของชิ้นงานก่อนเผา รวมทั้งสมบัติหลังการเผา การสุกตัว ความแข็งแรง การดูดซึมน้ำ การหดตัวและการวัดค่าสี

## 1.2. วัตถุประสงค์

1. ศึกษาปัจจัยการเกิดคราบขาวบนผิวผลิตภัณฑ์จากเนื้อดินปั้นราชบุรี
2. ศึกษาผลของการโซเดียมคาร์บอเนตที่มีต่อสมบัติหลังเผาของเนื้อดินปั้นราชบุรี

## 1.3. ขอบเขตของงานวิจัย

สำหรับงานวิจัยนี้จะศึกษาปัจจัยการเกิดคราบขาวโดยการเติมสารเติมแต่งเช่น โซเดียมคาร์บอเนต แบเรียมคาร์บอเนต โซเดียมฟอสเฟต และโซเดียมคลอไรด์ โดยการละลายสารเติมแต่งเหล่านี้ด้วยน้ำกลั่นแล้วผสมกับดินในปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนักหลังจากทำการนวด ขึ้นรูป อบแห้ง และทำการเผาที่อุณหภูมิ 850 900 และ 950 องศาเซลเซียส ทำการวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณของไอออนต่างๆ บริเวณผิวหน้าและในเนื้อของตัวอย่างรวมทั้งสมบัติทางกายภาพหลังการเผา การสุกตัว ความแข็งแรง การดูดซึมน้ำ การหดตัวและการวัดค่าสี

## 1.4. ผลที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถแก้ปัญหาคราบขาวในผลิตภัณฑ์หลังเผาโดยการเติมโซเดียมคาร์บอเนตในเนื้อดินราชบุรี

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1. เครื่องปั้นดินเผาเนื้อดินแดง

เครื่องปั้นดินเผาเนื้อดินแดง ทำการขึ้นรูปจากเนื้อดินปั้นเนื้อดินแดงให้ได้รูปร่างตามต้องการเช่นผลิตภัณฑ์จำพวกกระถางต้นไม้ เครื่องประดับสวน อีฐุ กระเบื้องเนื้อดินแดง ดังแสดงรูปที่ 2.1 ทำการเผาที่อุณหภูมิต่ำ 800-1000 องศาเซลเซียส มีการดูดซึมน้ำร้อยละ 10-15<sup>[8]</sup> มีสีหลังเผาเป็นสีแดงส้มหรือน้ำตาลแดงงามธรรมชาติเนื่องจากมีปริมาณสนิมเหล็ก ( $Fe_2O_3$ ) ในเนื้อดิน การเลือกเนื้อดินที่นำมาใช้ในแต่ละแหล่งพื้นที่ที่แตกต่างกันทำให้ผลิตภัณฑ์มีลักษณะเฉพาะของแต่ละท้องถิ่นรวมทั้งวัตถุดิบอื่นที่นำมาผสมหรือสิ่งเจือปนที่ติดมากับเนื้อดินด้วย



รูปที่ 2.1 เครื่องปั้นดินเผาเนื้อดินแดง<sup>[9]</sup>

#### 2.2. ดินเหนียวสำหรับผลิตภัณฑ์เนื้อดินแดง

ดินสำหรับงานเครื่องปั้นดินเผาหรือดินแดงในแหล่งธรรมชาติทั่วไปบนผิวโลกมีผลวิเคราะห์ทางเคมีแตกต่างกันไป บางชนิดมีทรายปนในเนื้อดินมาก บางชนิดมีความเหนียวและเนื้อละเอียด ปริมาณของแร่ในดินแต่ละแหล่งแตกต่างกันไปด้วย โดยปกติองค์ประกอบทางเคมีของดินแดงนอกจากจะมีแร่โอลิไนท์ แล้ว ยังประกอบด้วยแร่ไมกา ควอตซ์ เฟลด์สปาร์ ซัลเฟต เหล็กออกไซด์ เหล็กไฮดรอกไซด์ แคลเซียมออกไซด์ แมกนีเซียมออกไซด์ โซเดียมออกไซด์ และโพแทสเซียมออกไซด์ ซึ่งมีในปริมาณเล็กน้อยไม่เท่ากันในดินแต่ละแหล่ง ทำให้เนื้อดินแต่ละชนิดเผาสุกตัวที่

อุณหภูมิต่างกัน ซึ่งทำให้สีภายหลังการเผาแตกต่างกันไป เช่น สีเหลือง สีส้มนวล สีแดง สีแดงเข้ม และสีน้ำตาลเป็นต้น ถ้าในเนื้อดินมีแร่เหล็กประเภทออกไซด์หรือและไฮเดรต (Hydrated) เนื้อดินภายหลังการเผาจะได้สีส้มแดงสวยงาม แต่ถ้าในเนื้อดินมีแร่เหล็กประเภทซัลไฟด์ (Sulfide) เนื้อดินจะเกิดจุดในเนื้อผลิตภัณฑ์ ถ้าในเนื้อดินแดงมีปริมาณของหินปูนมากกว่าร้อยละ 30 แล้วนำมาเผาที่อุณหภูมิต่ำกว่า 800 องศาเซลเซียส ดินจะยุบตัวหลังการเผา เนื่องจากแคลเซียมเกิดการสลายตัวในรูปผลึกที่อุณหภูมิดังกล่าว ดังนั้นเพื่อป้องกันปฏิกิริยาการยุบตัวของผลิตภัณฑ์ ควรเผาที่อุณหภูมิ 900-1050 องศาเซลเซียส จึงปลอดภัยสำหรับเนื้อดินเทอราโคตตา เพราะเกลือซัลเฟตจากแคลเซียม จะเกาะรวมตัวกับซิลิกาและอะลูมินาในอุณหภูมิที่สูงกว่า 900 องศาเซลเซียส แต่ถ้าเผาเกินอุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส หินปูนในเนื้อดินจะทำหน้าที่เป็นตัวหลอมละลาย ซึ่งทำให้ผลิตภัณฑ์หรืออิฐที่ทำจากดินแดง เกิดการหดตัวอย่างรวดเร็ว ผลิตภัณฑ์มีขนาดเล็กลงมากไม่ได้ขนาดมาตรฐานเดิม การเผาเนื้อดินเทอราโคตตาคุมได้ยาก ถึงแม้บางครั้งจะเผาในเตาเดียวกัน แต่คุณภาพของผลิตภัณฑ์มีสีผิวความมันวาวไม่สม่ำเสมอ

แร่ยิปซัมก็เป็นแร่ที่พบได้บ่อยในดินแดง โดยจะเปลี่ยนรูปผลึกเป็นแคลเซียมซัลเฟตโดยการละลายน้ำที่อุณหภูมิประมาณ 200 องศาเซลเซียส และตามทฤษฎี แคลเซียมซัลเฟต ( $\text{CaSO}_4$ ) เกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส แต่เนื่องจากในดินแดงมีสารมลทินในปริมาณสูง จึงทำให้เนื้อดินเกิดการหลอมตัวที่อุณหภูมิต่ำกว่า 1200 องศาเซลเซียส ส่วนแมกนีเซียมซัลเฟตในดินแดงจะเกิดปฏิกิริยาในอุณหภูมิประมาณ 1000 องศาเซลเซียสซึ่งต่ำกว่าอุณหภูมิของแร่ยิปซัมแต่ไม่ค่อยพบสารแมกนีเซียมซัลเฟตในดินแดงมากนัก ในบางครั้งจะพบสารประกอบของโพแทสเซียมซัลเฟตและโซเดียมซัลเฟตในดินแดงด้วยแต่ไม่บ่อยนัก

การเผาเนื้อดินแดงจะต้องระวังในการใช้เชื้อเพลิงที่มีความบริสุทธิ์ และเผาในบรรยากาศสันดาปสมบูรณ์ ถ้าใช้เชื้อเพลิงถ่านหินที่มีกำมะถันในการเผาไหม้เจือปน สามารถทำปฏิกิริยากับผิวผลิตภัณฑ์กลายเป็นเกลือซัลเฟต ผิวดินจะหลอมตัวเป็นมันวาวได้ ถึงแม้ว่าจะมีปริมาณของกำมะถันอยู่เพียงร้อยละ 1.5 ก็ยังสามารถทำปฏิกิริยากับเนื้อผลิตภัณฑ์ได้ทำให้เกิดเกลือซัลเฟตหลอมตัวเป็นมันวาวบนผิวผลิตภัณฑ์จะเริ่มก่อตัวที่อุณหภูมิระหว่าง 600-800 องศาเซลเซียส ถ้ามีกำมะถันในเตาเผาเกินร้อยละ 0.5 ขึ้นไป ดินแดงที่ใช้ทำผลิตภัณฑ์ดินเผาพื้นบ้านและทำอิฐจัดเป็นดินที่มีคุณภาพต่ำ ซึ่งรวมทั้งดินดานหรือดินตะกอนด้วยดินแดงและดินดานต่างมีองค์ประกอบทางเคมีสลับซับซ้อน และมีแร่ธาตุเจือปนอยู่มากกว่าดินขาว

สีของดินแดงที่ผู้ผลิตอิฐนิยม เผาแล้วจะต้องได้สีแดงสด แต่สีแดงในอิฐเกิดจากองค์ประกอบของวัตถุดิบหลายตัว เช่น เหล็กออกไซด์ อะลูมินา หินปูน และขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในการเผาด้วยการนำวัตถุดิบที่เป็นแร่ธาตุที่ให้สีในดินแดงมาเผาทดสอบที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียสจะได้สีแตกต่างกันไปตามตารางที่ 2.1 <sup>[10, 11]</sup>

ตารางที่ 2.1 การทดสอบองค์ประกอบของวัตุดิบที่ให้สีในดินแดง <sup>[11]</sup>

วัตุดิบให้สีในดินแดง	สีหลังการเผา
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	สีน้ำตาลเข้มอมม่วง
$\text{CaO} - \text{Fe}_2\text{O}_3$	สีม่วงอมเทา
$\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Fe}_2\text{O}_3$	สีแดงเข้ม
$7\text{CaO} - \text{Fe}_2\text{O}_3$	สีเทาอ่อน
$4\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Fe}_2\text{O}_3$	สีเหลืองอมเทา
$\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Fe}_2\text{O}_3$	สีแดงอมน้ำตาล
$7\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Fe}_2\text{O}_3$	สีเหลืองอมเทา
$2\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Fe}_2\text{O}_3$	สีแดงเข้ม
$4\text{CaO} - \text{Fe}_2\text{O}_3$	สีเทา
$\text{CaO} - 2\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Fe}_2\text{O}_3$	สีแดง
$4\text{CaO} - 2\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Fe}_2\text{O}_3$	สีเหลืองอมเทา
$7\text{CaO} - 2\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Fe}_2\text{O}_3$	สีเหลืองสด

### 2.3. คราบเกลือสีขาว

คราบเกลือ (scum) คราบสีขาวหรือสีอื่นที่จับอยู่บนผิวผลิตภัณฑ์เป็นชั้นบางๆ ดังแสดงรูปที่ 2.2 เกิดจากเกลือละลายน้ำได้ที่อยู่ในเนื้อผลิตภัณฑ์ เมื่อน้ำซึมออกมาบนผิวของผลิตภัณฑ์เกิดการสะสมของเกลือ ซึ่งทำให้เห็นเป็นคราบเกลือสีขาวสาเหตุสำคัญของคราบเกลือสีขาวก็คือดินเหนียวที่ใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับอุตสาหกรรมเซรามิกนั้นมักมีสารประกอบซัลเฟต ซึ่งอาจอยู่ในรูปของสารประกอบอินทรีย์ของซัลเฟต (organic sulfate) หรืออนินทรีย์ของซัลเฟต (inorganic-sulfate) ปะปนอยู่ในเนื้อดิน แต่ส่วนใหญ่ซัลเฟตที่พบในดิน เช่น แคลเซียมซัลเฟต แมกนีเซียมซัลเฟต ( $\text{MgSO}_4$ ) เฟอริกซัลเฟต ( $\text{FeSO}_4$ ) สารประกอบซัลเฟตเหล่านี้สามารถละลายน้ำได้ดี ปริมาณซัลเฟตที่ละลายออกมาจากเนื้อดินขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของน้ำ ระยะเวลาที่ซัลเฟตสามารถละลายออกมาได้ และอีกส่วนมาจากน้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิต น้ำที่ใช้ อาจเป็นน้ำบาดาล น้ำจากแม่น้ำ หรือทะเลสาบ แหล่งน้ำบาดาลจะมีปริมาณของเกลือละลายน้ำที่ค่อนข้างคงที่และไม่ค่อยพบสารแขวนลอยอยู่ การนำน้ำมาใช้ในอุตสาหกรรมเซรามิกสิ่งที่ต้องคำนึงถึงมากคือความกระด้าง (hardness) ความกระด้างของน้ำเกิดจากแมกนีเซียมหรือแคลเซียมซัลเฟต คลอไรด์ หรือไบคาร์บอเนต การที่น้ำมีไอออนของแคลเซียมและซัลเฟตสูงจะมีผลกระทบต่อผลิตภัณฑ์



เซรามิกเป็นอย่างมาก เมื่อนำเนื้อดินปั้นที่มีเกลือเหล่านี้มาขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ เกลือก็จะละลายปนอยู่ในน้ำ เมื่อนำผลิตภัณฑ์ไปอบแห้งน้ำที่อยู่ในเนื้อของผลิตภัณฑ์จะระเหยออกมาจากภายใน เคลื่อนขึ้นมาที่ผิวด้วยแรงแคปพิลลารี (capillary force) ทำให้มีการสะสมของเกลือที่พื้นผิวของผลิตภัณฑ์ ซึ่งเห็นเป็นคราบเกลือสีขาว<sup>[4, 11, 12]</sup> นอกจากนี้เกลือแคลเซียมหรือแมกนีเซียมซึ่งจะให้คราบเกลือสีขาวหรือเทาแล้ว ยังมีคราบเกลือสีน้ำตาลซึ่งเกิดจากเฟอริกซัลเฟต (ferric sulfate) ที่อยู่ในเนื้อดินทำปฏิกิริยากับอากาศกลายเป็นเฟอริกออกไซด์คราบเกลือสีเหลืองที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างกรดซัลฟิวริก (sulfuric acid) ในรูปแก๊สที่เกิดขึ้นภายในเตาทำปฏิกิริยากับอะลูมินา ไดม์ และซิลิกาภายในเตาที่อุณหภูมิที่เกิดเนื้อแก้ว (vitrification) คราบเกลือสีเหลืองและเขียว ซึ่งเกิดจากสารประกอบวานาเดียมและโมลิบดีนัม<sup>[13]</sup>



รูปที่ 2.2 รูปผลิตภัณฑ์ที่เกิดคราบขาว

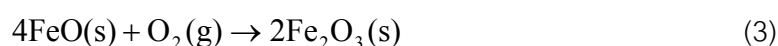
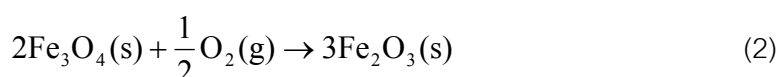
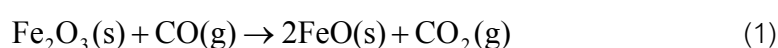
ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.2 สารประกอบซัลเฟตที่ให้ออกไซด์ของโลหะเมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิสูง<sup>[10]</sup>

Sulfate	Decomposition begins at °C.	Rapid decomposition °C	Product of decomposition	Color of product
FeSO <sub>4</sub>	167	480	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·2SO <sub>3</sub>	yellow brown
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·2SO <sub>3</sub>	492	560	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	red
Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	590	639	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	white
CuSO <sub>4</sub>	653	670	2CuO·SO <sub>3</sub>	orange
MnSO <sub>4</sub>	699	790	Mn <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	red
ZnSO <sub>4</sub>	702	720	3ZnO·2SO <sub>3</sub>	white
2CuO·SO <sub>3</sub>	702	736	CuO	black
NiSO <sub>4</sub>	702	764	NiO	green
CoSO <sub>4</sub>	720	770	CoO	brown
3ZnO·2SO <sub>3</sub>	755	767	ZnO	white
MgSO <sub>4</sub>	890	972	MgO	white
CaSO <sub>4</sub>	1200	-	CaO	white
BaSO <sub>4</sub>	1510	-	BaO	white

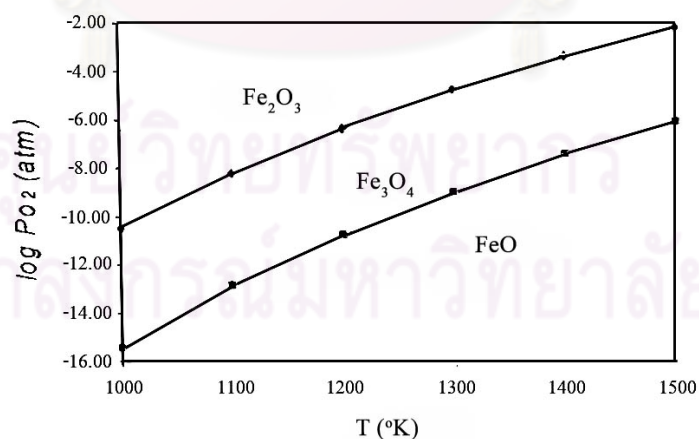
#### 2.4. สีที่เกิดหลังการเผาเซรามิก

เหล็กออกไซด์เป็นสารที่สำคัญในการทำให้เกิดสีต่างๆ ในผลิตภัณฑ์ดินเผา โดยมีอยู่ในดินทั่วไปประมาณร้อยละ 1-8 ในบางกรณีอาจมีการเพิ่มเหล็กออกไซด์ลงไปเพื่อให้สีดูเข้มมากขึ้น สำหรับเฮมาไทต์ (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) เป็นสารประกอบที่มีสีแดงซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญที่ให้สีแดง<sup>[14]</sup> เมื่อถูกรีดิวซ์โดยคาร์บอนมอนอกไซด์ จะเปลี่ยนรูปไปเป็นแมกนีไทต์ (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) หรือ เฟอรัสออกไซด์ (FeO) ดังแสดงไว้ในสมการที่ 1 โดยสารประกอบทั้งสองชนิดจะให้สีดำที่ทุกอุณหภูมิ ปฏิกิริยารีดักชันจากเฟอริกออกไซด์ซึ่งมีสีแดงกลายเป็นเฟอรัสออกไซด์ซึ่งมีสีดำจะเกิดขึ้นถ้ามีคาร์บอนมอนอกไซด์อยู่ในภายในเตาเผาคาร์บอนมอนอกไซด์เกิดขึ้นเมื่อมีปริมาณออกซิเจนไม่เพียงพอในการเผาไหม้เชื้อเพลิง



ออกซิเจนที่พอเพียงจะช่วยรักษาสภาพเฟอร์ริกออกไซด์ตามสมการที่ 2 และสมการที่ 3 ซึ่งจะให้สีแดง โดยที่สีอาจจะแปรเปลี่ยนจากสีส้มจนถึงสีม่วงขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ทำการเผาสีอ่อนๆ เกิดจากการเผาที่อุณหภูมิต่ำกว่าที่ 2.3 แสดงเสถียรภาพของเฟส (Phase) ต่างๆ ในระบบ Fe-O

เฮมาไทต์จะคงไว้ที่สภาวะออกซิเดชัน โดยสีที่ได้จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้ทำการเผาสีของเฮมาไทต์เกิดจากโครงสร้างผลึกที่บกพร่อง และปริมาณจุดบกพร่องต่อปริมาตรจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ความบกพร่องที่เกิดขึ้นเป็นกระบวนการที่ย้อนกลับได้ แต่อัตราการสลายตัวของจุดบกพร่องในอากาศจะช้าการเกิดจุดบกพร่องขณะให้ความร้อน ที่อุณหภูมิค่า  $Fe_2O_3$  จะให้สีส้ม ในขณะที่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น จะเปลี่ยนเป็นสีแดงเข้ม และกลายเป็นสีดำที่อุณหภูมิ 1316 องศาเซลเซียส ปฏิกิริยารีดักชันของเหล็กออกไซด์ที่อุณหภูมิสูงมักจะให้สีน้ำตาลและสีดำจากวัตถุดิบสีแดงผลิตภัณฑ์ดินเผาสามารถทำให้เกิดสีชมพูหรือสีแดงอ่อนได้ โดยใช้หลักการของความสามารถของเฟอร์ริกไอออน ( $Fe^{3+}$ ) เข้าไปโครงสร้างของมัลไลต์เป็นสารละลายของแข็งแบบแทนที่เฟอร์ริกไอออนเข้าไปแทนที่อะลูมิเนียมไอออน ( $Al^{3+}$ ) ได้ในระดับหนึ่ง เมื่อเหล็กเข้าไปในมัลไลต์ (Mullite) สีขาวของมัลไลต์จะเปลี่ยนเป็นสีเหลืองอ่อนที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส มัลไลต์สามารถรับเฮมาไทต์เข้าเป็นสารละลายของแข็งที่ร้อยละ 1.2 โดยน้ำหนัก ร้อยละ 3.8 ที่ 1200 องศาเซลเซียส และร้อยละ 7.6 ที่ 1300 องศาเซลเซียสปฏิกิริยาในสารละลายของแข็งระหว่างมัลไลต์และเฮมาไทต์ ทำให้เกิดการสูญเสียเฟสเฮมาไทต์สีแดงจากโครงสร้าง และเมื่อมัลไลต์เกิดขึ้นในปริมาณที่เพียงพอที่จะรับเหล็กออกไซด์ทั้งหมด สีแดงในชิ้นงานก็จะถูกกำจัดออกไป<sup>[15-17]</sup>



รูปที่ 2.3 การเปลี่ยนแปลงเฟสของและความเสถียรของเหล็กออกไซด์ชนิดต่างๆ<sup>[16]</sup>

## 2.5. น้ำในผลิตภัณฑ์

น้ำเป็นสิ่งสำคัญในกระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เซรามิกและน้ำมีความสัมพันธ์โดยตรงกับกลไกการอบแห้งซึ่งเป็นผลต่อการหดตัวของผลิตภัณฑ์ น้ำในเนื้อเซรามิกมีหลายลักษณะ ได้แก่

น้ำที่มากพอจนดินอยู่ในรูปของสารแขวนลอย (Filtrate Water) น้ำที่อยู่ระหว่างอนุภาคของดิน (Shrinkage Water) น้ำที่อยู่ในรูพรุน (Pore Water) น้ำที่ถูกดูดซับ (Absorbed Water) และน้ำที่อยู่ในโครงสร้างผลึก (Crystal Lattice Water)

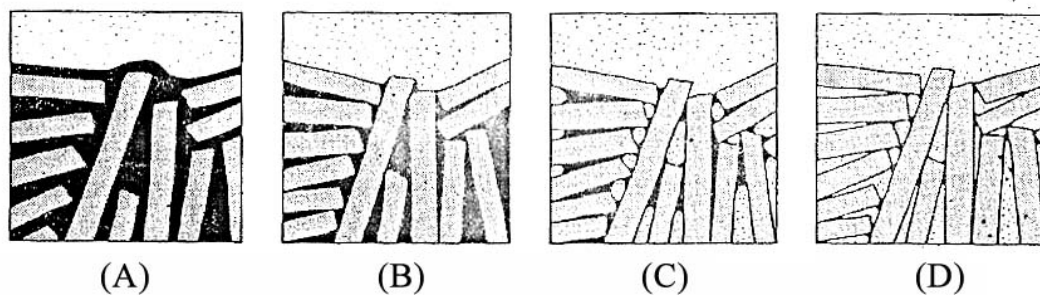
นอกจากนี้สามารถแบ่งน้ำในผลิตภัณฑ์เป็น ประเภทใหญ่ ๆ ได้ 3 ประเภท คือ

1. น้ำที่อยู่ในโครงสร้างผลึก (Chemical Water) เป็นน้ำที่อยู่ในโครงสร้างทางเคมีต้องใช้พลังงานมากเพื่อกำจัดน้ำนี้ออกจากเนื้อเซรามิก

2. น้ำที่ใช้เพื่อการขึ้นรูป (Mechanical Water) เป็นน้ำที่ทำให้เกิดความเหนียวเพื่อให้สามารถขึ้นรูปได้ ผู้ปฏิบัติงานจะเติมน้ำในอัตราส่วนของเนื้อดินนั้น เพื่อให้มีสภาพเอื้อต่อการปฏิบัติงาน เช่น เป็นน้ำดิน เป็นดินเหนียวหรือเป็นดินผง

3. น้ำที่อยู่ในบรรยากาศ (Hygroscopic Water) เป็นน้ำที่อยู่นอกผลิตภัณฑ์ หรือนอกเนื้อดินนั้น โดยอยู่ในสภาพแวดล้อมซึ่งมีผลต่อความชื้นในผลิตภัณฑ์ และการอบแห้ง

น้ำที่อยู่ในรูปของสารแขวนลอยเป็นน้ำที่อยู่ในน้ำดินซึ่งจะถูกดูดออกไปในกระบวนการหล่อแบบ ส่วนน้ำที่อยู่ระหว่างอนุภาคของดินเป็นน้ำที่เหลือจากการกำจัดออกไม่สมบูรณ์ในกระบวนการหล่อแบบหรือเป็นน้ำที่เติมลงในเนื้อดินเพื่อให้มีความเหนียวพอสำหรับใช้ในการขึ้นรูป ดังนั้นเมื่ออบแห้งน้ำส่วนนี้จะถูกกำจัดออกไป โดยมีการถ่ายเทความชื้นจากภายในของชิ้นงานออกมาที่ผิว ซึ่งผ่านทางช่องว่างขนาดเล็กๆ ระหว่างอนุภาคแสดงดังรูปที่ 2.4(A) เมื่อน้ำเริ่มระเหยออกไป อนุภาคของดินจะเคลื่อนเข้าหากันจนมาสัมผัสกัน แสดงดังรูปที่ 2.4(B) ขณะที่ดินหดตัวเต็มที่ ผิวดินจะแห้งไม่ปรากฏน้ำหรือความชื้นอยู่ปริมาณน้ำที่หลุดออกไปทั้งหมดในช่วงนี้จะมีปริมาตรเท่ากับการหดตัวในเชิงปริมาตรของดินน้ำที่ระเหยไปในช่วงนี้น้ำที่อยู่ระหว่างอนุภาคของดิน ดังนั้นผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปด้วยการเทแบบและใช้ความเหนียวในการขึ้นรูป จะมีขนาดลดลงมากกว่าผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปด้วยวิธีอัด ซึ่งการขึ้นรูปด้วยวิธีอัดจะใช้ดินผงที่มีน้ำในองค์ประกอบน้อย ทำให้ขนาดผลิตภัณฑ์อาจจะไม่เปลี่ยนแปลง ส่วนน้ำที่คงเหลืออยู่ระหว่างอนุภาคที่เคลื่อนเข้ามาติดกันเรียกว่าน้ำที่อยู่ในรูพรุนจะระเหยออกมาก็ทำได้ค่อนข้างยากและเป็นไปอย่างช้าๆ อาจต้องใช้ความร้อนช่วย ซึ่งน้ำจำนวนนี้จะถูกไล่ออกหมดเมื่ออบที่ อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ช่วงนี้จะเป็นช่วงสุดท้ายของการอบแห้ง โครงสร้างของดินจะไม่เกิดการหดตัว ดังนั้นในเนื้อดินนั้นที่ประกอบด้วย อนุภาคดินที่ละเอียดมากๆ เมื่ออนุภาคมาชิดกันช่องว่างระหว่างอนุภาคจะมีขนาดเล็กลงด้วยทำให้น้ำในรูพรุนระเหยออกยากยิ่งขึ้น น้ำที่ถูกดูดซับเกิดขึ้นจากผลของแรงระหว่าง อนุภาคของดิน แสดงดังรูปที่ 2.4(C) ซึ่งน้ำนี้จะถูกดูดซับไว้ แต่มีปริมาณน้อยมากและจะถูกกำจัดออกไปเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น น้ำที่อยู่ในโครงสร้างผลึกก็จะถูกกำจัดไปด้วย

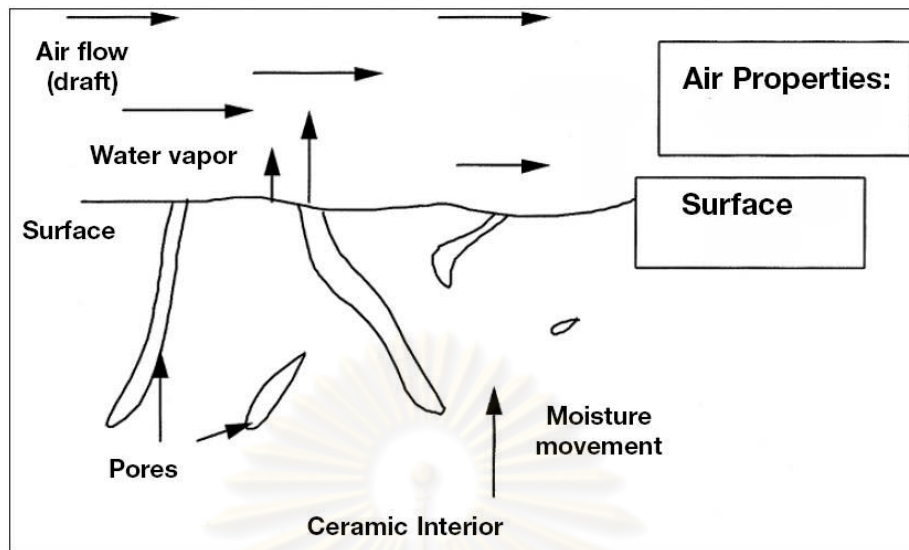


รูปที่ 2.4 ลักษณะของน้ำและการจัดเรียงตัวของอนุภาคในการอบแห้งดิน<sup>[14]</sup>

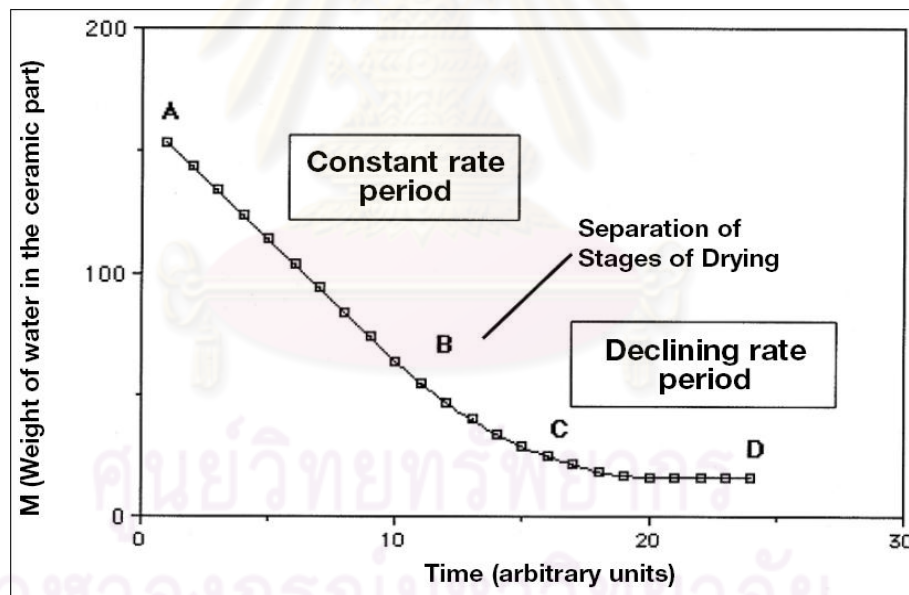
## 2.6. กระบวนการอบแห้งของผลิตภัณฑ์

กระบวนการอบแห้งของผลิตภัณฑ์มีความสำคัญมากถ้าเป็นไปได้ในทางอุตสาหกรรมต้องทำให้ผลิตภัณฑ์แห้งเร็วเพื่อลดระยะเวลาในการผลิต ซึ่งการทำให้ผลิตภัณฑ์แห้งเร็วก็จะเกิดปัญหาจากการหดตัวที่แตกต่างกันทำให้ผลิตภัณฑ์แตกเสียหาย

การเคลื่อนตัวของน้ำภายในเนื้อดินขึ้นมาตามรูพรุนเมื่อน้ำที่ผิวของเนื้อดินระเหยไปน้ำในเนื้อดินจะเคลื่อนที่ขึ้นมาแทนที่กระบวนการนี้เป็นไปอย่างต่อเนื่องเราอธิบายกลไกของปรากฏการณ์อันนี้ได้ 2 กรณี กรณีแรกคือเมื่อรูพรุนในเนื้อดินมีน้ำอยู่เต็มจะมีแรงสองแรงมากระทำแรงหนึ่งเป็นแรงไฮโดรสแตติกดันน้ำภายในรูพรุนให้ออกมาที่ผิวจนกว่าจะสมดุล อีกแรงเกิดจากความต่างศักย์ของความชื้น ซึ่งจะขับน้ำจากบริเวณที่ชื้นมากกว่าภายในเนื้อดินออกมายังผิวซึ่งแห้งกว่า ในกรณีในรูพรุนมีน้ำไม่มากนักหรือใกล้จะแห้ง การเคลื่อนที่ของน้ำในรูพรุนเป็นแบบการระเหยซึ่งขึ้นกับแรงขับเคลื่อนจากความต่างศักย์ของความดันไอในรูพรุนซึ่งต่อเนื่องกันแบบหลอดเล็ก ๆ แสดงในรูป 2.5 อัตราเร่งของการระเหยของน้ำที่ผิวของผลิตภัณฑ์มีค่าประมาณครึ่งหนึ่งของอัตราเร่งของน้ำจากผิวน้ำด้วยตัวเอง ปัจจัยของการทำให้ผลิตภัณฑ์แห้ง ได้แก่ อุณหภูมิ ความดันไอในอากาศ และความเร็วม อัตราเร็วของกระบวนการระเหยแห้ง คือการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของความชื้นในเซรามิกต่อหน่วยเวลาจากรูปที่ 2.6 แสดงกราฟของน้ำหนักความชื้นในเซรามิกต่อเวลาซึ่งอัตราเร็วของกระบวนการระเหยแห้งคือความชัน (slope) ของเส้นกราฟนั่นเอง



รูปที่ 2.5 ภาพจำลองกระบวนการระเหยแห้งของความชื้นของผลิตภัณฑ์<sup>[18]</sup>

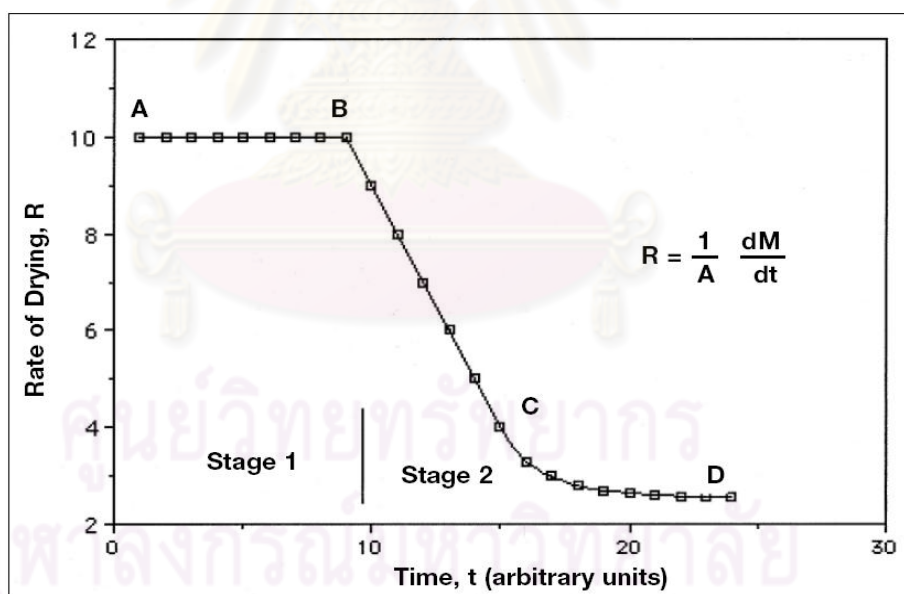


M คือ น้ำหนักของน้ำในเซรามิก      A คือ พื้นที่ผิวของเซรามิกที่สัมผัสกับสภาพแวดล้อมของกระบวนการระเหยแห้ง

รูปที่ 2.6 การเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นในเซรามิกระหว่างการเผา<sup>[18]</sup>

เมื่อนำข้อมูลจากกราฟในรูปที่ 2.6 มาสร้างกราฟระหว่าง อัตราเร็วของกระบวนการระเหยแห้งต่อเวลาดังรูปที่ 2.7 พบว่า อัตราเร็วคงที่ในช่วงแรกของกระบวนการระเหยแห้ง (จากจุด A ถึง จุด B) เมื่อถัดจากจุด B ไปอัตราเร็วของกระบวนการระเหยแห้งจะลดลงด้วยอัตราเร็วคงที่ ช่วงระหว่างจุด B ถึง จุด C เรียกว่าช่วงอัตราเร็วลดลงช่วงที่ 1 ในช่วงถัดไปของกระบวนการระเหยแห้ง (จากจุด C ถึง จุด D) อัตราเร็วของกระบวนการระเหยแห้งจะดำเนินไปอย่างช้าๆ จนกระทั่งกระบวนการระเหยแห้งจะสมบูรณ์ เรียกช่วงนี้ว่า ช่วงอัตราเร็วลดลงช่วงที่ 2

กระบวนการระเหยแห้งมี 2 ขั้นตอนที่สำคัญคือ ขั้นตอนที่ 1 คือช่วงที่อัตราเร็วคงที่ และขั้นตอนที่ 2 คือ ช่วงอัตราเร็วลดลงช่วงที่ 1 และ 2 ปริมาณความชื้นที่จุด B ในรูปที่ 2.6 และ 2.7 เรียกว่าปริมาณความชื้นวิกฤต ( $M_c$ ) เพราะทำให้เกิดการหดตัวเมื่อการอบใกล้จุดปริมาณความชื้นวิกฤต แต่การหดตัวที่จุดต่ำกว่าปริมาณความชื้นวิกฤตนั้นไม่สำคัญ เมื่ออบเซรามิกถึงจุดปริมาณความชื้นวิกฤตเรียกเซรามิกเหล่านั้นว่ามีความแข็งเหมือนหนัง (Leather-Hard) ในกระบวนการผลิตเซรามิกแบบดั้งเดิม จุดนี้เป็นจุดที่สามารถเคลื่อนย้ายผลิตภัณฑ์ได้โดยไม่กลัวว่าผลิตภัณฑ์จะบิดเบี้ยวไปจากเดิม



รูปที่ 2.7 อัตราเร็วของกระบวนการระเหยแห้ง<sup>[18]</sup>

สรุปว่ากระบวนการระเหยแห้งของเซรามิกแบ่งเป็น 2 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนที่ 1 ช่วงที่อัตราเร็วคงที่ซึ่งเป็นช่วงที่เซรามิกเกิดการหดตัว และหยุดการหดตัวเมื่อถึงจุดปริมาณความชื้นวิกฤต และขั้นตอนที่ 2 คือ ช่วงอัตราเร็วลดลงช่วงที่ 1 และ 2 เนื่องจากเกิดการหดตัวในขั้นตอนที่ 1 จึงจำเป็นต้องจำกัดอัตราเร็วของกระบวนการระเหยแห้งเพื่อป้องกันการแตกของชิ้นงานเมื่อสิ้นสุด

ขั้นตอนที่ 1 กลวิธีการอบจะเปลี่ยนไปเพราะไม่เกิดการหดตัวของชิ้นงานแล้ว คือการให้อุณหภูมิสูงเพื่อเร่งให้เกิดการแห้งอย่างสมบูรณ์ ในขั้นตอนที่ 2 เมื่อสร้างกราฟของความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วของกระบวนการระเหยแห้งและความชื้นในผลิตภัณฑ์ดังรูปที่ 2.8<sup>[18-20]</sup>

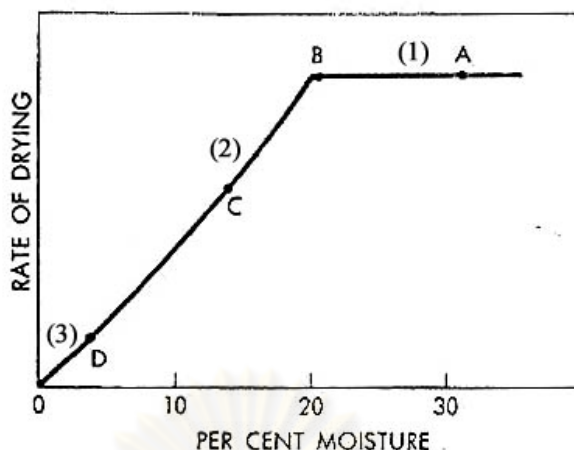
ในช่วงที่อัตราเร็วคงที่ น้ำบนผิวของผลิตภัณฑ์ก่อนเผาจะระเหยออกจนหมด ซึ่งสภาวะจะคล้ายกับการระเหยที่เกิดขึ้นบนผิวของน้ำการสูญเสียน้ำที่ระเหยจากผิวหน้าทำให้น้ำที่อยู่ในช่องว่างเล็กๆภายในผลิตภัณฑ์ผ่านรูพรุนแบบร่างแหมาที่ผิวหน้าเพราะขาดสมดุลของความชื้นที่บริเวณผิวหน้า เมื่อปริมาณน้ำมากพออัตราเร็วของกระบวนการระเหยแห้งและอุณหภูมิจะคงที่ ปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์ก่อนการเผาลดลงมากพอเนื่องจากสูญน้ำที่รูพรุน ความชื้นที่กระจายตัวอยู่ในผลิตภัณฑ์ที่เอาไปอบนั้นไม่เท่ากันที่จุดนี้ เช่น ที่พื้นที่บริเวณขอบจะแห้งกว่าภายในผลิตภัณฑ์ จากการที่แต่ละอนุภาคของดินเหนียวที่บริเวณผิวหน้าของผลิตภัณฑ์จะอยู่ใกล้กันมากกว่าบริเวณภายในผลิตภัณฑ์ เมื่ออนุภาคเหล่านี้เคลื่อนที่เข้าใกล้กันมากเป็นสาเหตุให้ปริมาณของผลิตภัณฑ์ก่อนเผาลดลง

เมื่อกระบวนการระเหยแห้งดำเนินต่อไประบบรูเล็กๆ ของผลิตภัณฑ์ไม่สามารถนำความชื้นออกจากภายในด้วยอัตราเร็วของการระเหยเท่ากับบริเวณผิวหน้า ดังนั้นปริมาณความชื้นที่ผิวจึงลดลงอย่างคงที่ เมื่อกระบวนการระเหยของน้ำปริมาณสุดท้ายที่เคลื่อนที่ออกจากภายในผลิตภัณฑ์อัตราการแห้งเริ่มต้นลดลง และกำลังดำเนินไปสู่ Leather-hard state ที่จุดแรกในช่วงอัตราเร็วลดลงช่วงที่ 1 กระบวนการระเหยแห้งภายในผลิตภัณฑ์จะต่างจากช่วงที่อัตราเร็วคงที่เมื่อระดับ

การระเหยจากผิวหน้าเริ่มเคลื่อนไปภายในผลิตภัณฑ์อย่างช้าๆ เมื่อน้ำจากภายในผลิตภัณฑ์ใกล้ถึงผิวหน้า สิ่งกีดขวางที่สำคัญที่เรียกว่าความต้านทานการแพร่ผ่านนั้นจะขัดขวางการเคลื่อนที่ของน้ำสู่ผิวหน้า ที่จุดนี้อัตราการระเหยจะตกลงอย่างคงที่เมื่อปริมาณความชื้นลดลง (รูปที่ 2.7, จุด B ถึง C)

ผลิตภัณฑ์เข้าสู่ช่วงสุดท้ายของกระบวนการระเหยแห้ง จะเหลือความชื้นประมาณ 2 ถึง 4 เปอร์เซ็นต์ การเปลี่ยนจากช่วงที่อัตราเร็วคงที่ ไปสู่ช่วงอัตราเร็วลดลงช่วงที่ 1 เรียกว่าปริมาณความชื้นวิกฤต (รูปที่ 2.7, จุด B) ช่วงอัตราเร็วลดลงช่วงที่ 2 (ขั้นที่ II, จุด C ถึง จุด D) น้ำปริมาณสุดท้ายถูกไล่ออกมา ระหว่างนี้ผลิตภัณฑ์ถูกเผาไม่นานแต่อุณหภูมิสูง ความชื้นจากภายในจะระเหยและเคลื่อนที่ผ่านรูพรุนเล็กๆ ที่อยู่ในรูปของร่างแหมาที่ผิวหน้าของผลิตภัณฑ์ อย่างไรก็ตามอัตราการระเหยยังคงลดลงอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของแรงต้านทานการแพร่ผ่านและ high retention force (polar bonds และ sorption force) ที่โมเลกุลของน้ำจุดเปลี่ยนที่สอง (รูปที่ 2.7, จุด C) เป็นจุดระหว่างช่วงอัตราเร็วลดลงช่วงที่ 1 และ ช่วงอัตราเร็วลดลงช่วงที่ 2





ขั้นตอนที่ 1 (จุด A ถึง จุด B) : ช่วงที่อัตราเร็วคงที่

ขั้นตอนที่ 2 (จุด B ถึง จุด C) : ช่วงอัตราเร็วลดลงช่วงที่ 1

ขั้นตอนที่ 3 (จุด C ถึง จุด D) : ช่วงอัตราเร็วลดลงช่วงที่ 2

**รูปที่ 2.8** ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วของกระบวนการระเหยแห้งต่อความชื้นในผลิตภัณฑ์  
ในอุดมคติ<sup>[14]</sup>

## 2.7. องค์ประกอบที่มีอิทธิพลต่อความเหนียวของดิน

ความเหนียวของดินเป็นสมบัติที่ทำให้ดินสามารถเปลี่ยนรูปร่างได้ เมื่อบ้นดินได้รูปทรงตามที่ต้องการแล้วยังสามารถที่จะรักษารูปร่างนั้นไว้โดยไม่ยุบตัวหรือเสียรูป สมบัติความเหนียวของดินอาจหาได้จากการหาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (Stress) กับ ความเครียด (Strain) ดังสมการที่ 5 กราฟดังแสดงรูปที่ 2.9 องค์ประกอบหลักที่จากกราฟที่ความชื้น ร้อยละ 22 ได้แก่

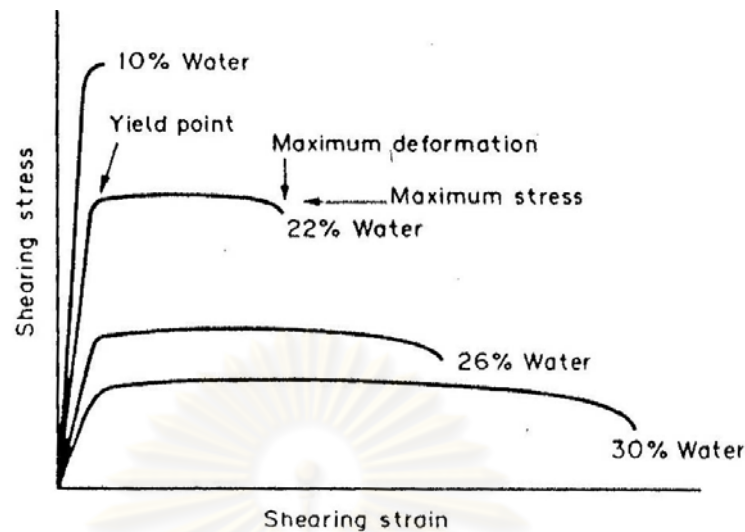
$$K = \frac{\text{Stress}}{\text{Strain}} \quad (5)$$

ค่าจุดคราก (Yield Point) เป็นค่าที่บ่งบอกถึงจุดเริ่มต้นของการเปลี่ยนรูปแบบที่ไม่สามารถคืนรูปได้ ซึ่งขึ้นอยู่กับความเค้นที่ให้ถ้าให้แรงด้วยอัตราเร็วสูงค่าจุดครากจะเกิดขึ้นเร็วทำให้ไม่สามารถแก้ไขรูปทรงได้ทันที ถ้าให้แรงอย่างช้าๆ เช่นการค่อยๆ บ้นด้วยมือจะทำให้แก้ไขรูปทรงต้องการก่อนที่จะถึงจุดคราก การสูญเสียรูปสูงสุด (Maximum deformation) หรือผลรวมของความเครียด (Total stress) เป็นค่าของดินเหนียวที่สามารถเปลี่ยนแปลงรูปทรงได้โดยยังไม่เกิดการแตกหักเสียหาย ค่าความเค้นสูงสุด (maximum Stress) เป็นค่าที่มีความสำคัญสำหรับการขึ้นรูปด้วยเครื่องรีดจึงมีความสำคัญต่อการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เพราะต้องการให้ผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการขึ้นรูปแล้วไม่เสียทรง แต่สำหรับการขึ้นรูปด้วยการบ้นด้วยมือไม่จำเป็นที่จะต้องใช้แรงเค้นที่สูงเนื่องจากต้องการเวลาที่ใช้ในการขึ้นรูป

ความไม่แน่นอนในผลการทดสอบการไหลของดินเหนียว เกิดมาจากเทคนิคการวัดที่มีความแตกต่างกัน เช่น กระบวนการทดสอบบางอย่างใช้การวัดความเค้นและบางอย่างใช้การวัดความเครียดมีประเด็นหนึ่งที่จะต้องพิจารณาคือโครงสร้างของดินที่มีการจัดเรียงตัวเป็นแผ่น โดยมีทิศทางการเรียงตัวที่แน่นอนจะมีผลกระทบต่อเกิดการเกิดการเปลี่ยนรูปในระหว่างทำการทดสอบ ทิศทางของความเค้นที่กระทำต่อตัวอย่างและทิศทางการเรียงตัวของอนุภาคในตัวอย่างจะมีผลต่อผลการทดสอบ เป็นที่แน่ชัดว่าการเปลี่ยนรูปในตัวอย่างทดสอบจะเกิดขึ้นได้ง่าย ถ้ามีความเค้นกระทำในแนวเดียวกับโครงสร้างที่เป็นลักษณะแผ่น เนื่องจากจะเกิดการสไลด์ระหว่างแผ่น ถ้าความเค้นกระทำกับตัวอย่างโดยทำมุมกับทิศทางการเรียงตัวของอนุภาค จะต้องมีการจัดเรียงตัวใหม่ของอนุภาคก่อนที่จะมีไหลของโครงสร้างซึ่งหมายถึงการแปรรูปจะเกิดได้ยากขึ้น

ถ้ามีการเพิ่มความเค้นให้กับดินเหนียวในช่วงแรกการไหลจะเกิดขึ้นในบริเวณที่มีการยึดตัวกันของอนุภาคไม่คืน ซึ่งถือเป็นจุดที่มีความอ่อนแอการไหลผ่านของแนวระนาบสลิป (Slip planes) จะเกิดขึ้นในบริเวณนี้ในช่วงที่มีการเปลี่ยนรูป อย่างไรก็ตามการเคลื่อนที่เหล่านี้จะมีผลทำให้มีการจัดเรียงตัวของอนุภาคซึ่งจะมีเสถียรภาพมากกว่าสภาพดั้งเดิมดังนั้นอาจต้องใช้แรงมากขึ้นในการรักษาอัตราการไหลของดิน เพราะไม่เช่นนั้นแนวระนาบสลิปอาจจะเกิดการยึดตัวกัน ความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้นในดินเหนียวภายใต้สภาพแรงเฉือนเป็นที่รู้จักกันดีในเรียกว่า shear hardening ในวงการอุตสาหกรรมเซรามิกมักจะกล่าวว่าดินเหนียวเกิดปรากฏการณ์ที่เรียกกันว่า memory ซึ่งหมายถึงพฤติกรรมของดินเหนียวขึ้นอยู่กับกระบวนการการผลิตที่ผ่านมาองค์ประกอบเหล่านี้ทำให้กระบวนการเปลี่ยนรูปของดินเหนียวมีความซับซ้อนขึ้น ซึ่งทำให้การประเมินอัตราการไหลของดินล่วงหน้าก็กระทำได้ยากขึ้นด้วยเช่นกัน

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่ปริมาณความชื้นต่างๆ<sup>[21]</sup>

องค์ประกอบที่มีอิทธิพลที่มีต่อความเหนียว<sup>[21, 22]</sup> ได้แก่

1. ขนาดและรูปร่างของอนุภาค อนุภาคละเอียดมีความเหนียวกว่าอนุภาคหยาบ อนุภาคที่มีรูปร่างที่ไม่เป็นระเบียบมีความเหนียวดีกว่าอนุภาคที่มีรูปร่างเป็นลูกบาศก์หรือทรงกลม ทั้งนี้เป็นเพราะอนุภาคที่มีความละเอียดและมีรูปร่างไม่เป็นระเบียบ จะมีเนื้อที่ที่สัมผัสกันได้มากกว่าอนุภาคหยาบๆ หรืออนุภาคที่มีรูปร่างจึงมีแรงดึงดูดซึ่งกันและกันมากกว่า

2. การใช้ของเหลวที่มีประจุและมีความหนืดมากผสมจะช่วยปรับปรุงให้มีความเหนียวดีขึ้น ข้อควรระวังก็คือปริมาณของน้ำที่เติมซึ่งไม่ได้หมายความว่าความละเอียดมากจะมีความเหนียวมากหากมีการเติมน้ำไม่เหมาะสม

3. ชนิดและปริมาณของอนุภาคที่ถูกดูดซับบนผิวของเนื้อดิน ก็ทำให้มีความเหนียวต่างกัน เช่น  $H^+$  หรือ  $Ca^+$  จะมีความเหนียวกว่าดินที่มี  $Na^+$  อยู่บนผิว อนุภาคของดินเป็นประจุลบ สามารถดึงดูดประจุบวกที่บริเวณผิวซึ่งประจุบวกมีความแข็งแรงน้อย เมื่อผ่านลงไปไนอิเล็กโตรไลต์ที่เหมาะสมไอออนลบอื่นก็สามารถเข้ามาแทนที่ได้เช่นกรณีที่ดินดูดซับ แคลเซียมไอออนที่พื้นผิวสามารถถูกแทนที่โดยโซเดียมไอออนเมื่อเติมโซเดียมคาร์บอเนตลงในเนื้อดิน จะทำให้สมบัติทางกายภาพแตกต่างออกไปโดย  $Na^+$  ในดินช่วยในการกระจายลอยตัว (Deflocculant) และลดความเหนียวของดิน ส่วนเกลือ  $Ca^{2+}$   $Mg^{2+}$  และ  $Al^{3+}$  เป็นสารช่วยให้เกิดการตกจม (Flocculant) และเพิ่มความเหนียวให้กับดิน

4. สารอินทรีย์ช่วยทำให้ดินมีความเหนียวมากขึ้นดังเห็นได้จากดินดำมีความเหนียวมากกว่าดินขาวเพราะว่าดินดำมีสารอินทรีย์บนอยู่ การขึ้นรูป  $Al_2O_3$  มักจะใช้พวกกาบแปงและขี้ผึ้งเป็นตัวช่วยให้เกิดความเหนียว

5. การนวดและการหมักช่วยให้ดินมีความเหนียวเพิ่มขึ้น เนื่องจากการหมักทำให้เนื้อดินกับน้ำรวมตัวกันได้ดีและทั่วถึงรวมทั้งการกระทำของแบคทีเรียมีส่วนให้ดินเหนียวดีขึ้น

## 2.8. การทดสอบความเหนียว

เครื่องมือสำหรับการวัดความเหนียวของดินเพื่อเป็นการหาค่าปริมาณความชื้นในดินที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูป โดยใช้เครื่อง Pfefferkorn plastic tester <sup>[21]</sup> ดังแสดงรูปที่ 2.10 ค่าสัมประสิทธิ์ความเหนียวได้จากการวัดค่าความแตกของ ความสูงของชิ้นงานเดิมกับชิ้นงานทดสอบหลังได้รับแรงแล้ว ชิ้นงานเกิดการเปลี่ยนรูปดังสมการที่ 6

$$a = \frac{h_0}{h_1} \quad (6)$$

a คือค่าสัมประสิทธิ์ความเหนียว

$h_0$  คือค่าความสูงเริ่มต้นของชิ้นงานทดสอบ (กำหนดคงที่เท่ากับ 40 มิลลิเมตร)

$h_1$  คือความสูงของชิ้นงานหลังการเปลี่ยนรูป

ค่าสัมประสิทธิ์ความเหนียวที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูป อยู่ระหว่าง 2.5 – 4.0 หากค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้น้อยกว่า 2.5 ดินจะมีความแข็งสูงเกินไปทำให้รูปยากเนื่องจากเนื้อดินค่อนข้างแห้ง และมีความเหนียวน้อย อย่างไรก็ตามค่าสำหรับการหาปริมาณความชื้นที่เหมาะสมของการทดสอบด้วยวิธีนี้สัมประสิทธิ์ความเหนียวมีค่า 3.3 หรือ 12 มิลลิเมตรในการอ่านสเกลมิลลิเมตร ดังรูปที่ 2.1 หลังจากนั้นทำชิ้นงานใช้งานให้แห้ง อบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส หาค่าความชื้นโดยใช้สมการ 7

$$W = \frac{G_1 - G_2}{G_1} \times 100 \quad (7)$$

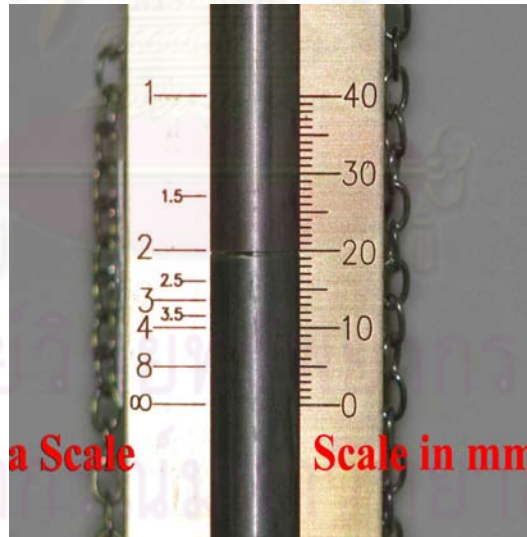
เมื่อ  $G_1$  คือน้ำหนักของชิ้นงานเปียก

$G_2$  คือน้ำหนักของชิ้นงานแห้ง

จากนั้นนำค่าที่ได้มาเขียนกราฟ เทียบความชื้นกับค่า สัมประสิทธิ์(a) เลือกค่าความชื้นที่เหมาะสมโดยเลือกจุดตัดที่ a เท่ากับ 3.3 หรือ 12 มิลลิเมตร



รูปที่ 2.10 เครื่อง Pfefferkorn plastic test และ อุปกรณ์สำหรับเตรียมชิ้นงานทดสอบ



รูปที่ 2.11 สเกลของเครื่อง Pfefferkorn plastic test

## 2.9. การขึ้นรูปด้วยมือ

การขึ้นรูปวิธีนี้คือการนำเอาเนื้อดินปั้นมาขึ้นรูปแบบอิสระต้องอาศัยความชำนาญเป็นพิเศษ เช่นการจับบีบ การขด การทำเป็นแผ่น และการตีดิน เพื่อให้ได้ลักษณะรูปร่างที่ต้องการ รูปร่างของผลิตภัณฑ์ที่ได้แก่ จาน ชาม กระจ่างโถ่งน้ำขนาดเล็กจนถึงขนาดใหญ่ สมบัติของดินจะต้องมีความเหนียวและเนื้อดินไม่นิ่มหรือแข็งจนเกินไป อัตราการสั่นของน้ำในเนื้อดินที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปร้อยละ 25-30



รูปที่ 2.12 การขึ้นรูปด้วยการขด

## 2.10. การขึ้นรูปด้วยเครื่อง

เป็นการขึ้นรูปที่นำเครื่องจักรกลมาใช้เพื่อให้การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ง่ายและสะดวกสบายขึ้น เหมาะสำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องการปริมาณที่มาก

### 2.10.1. การขึ้นรูปด้วยแป้นหมุน (Throwing)

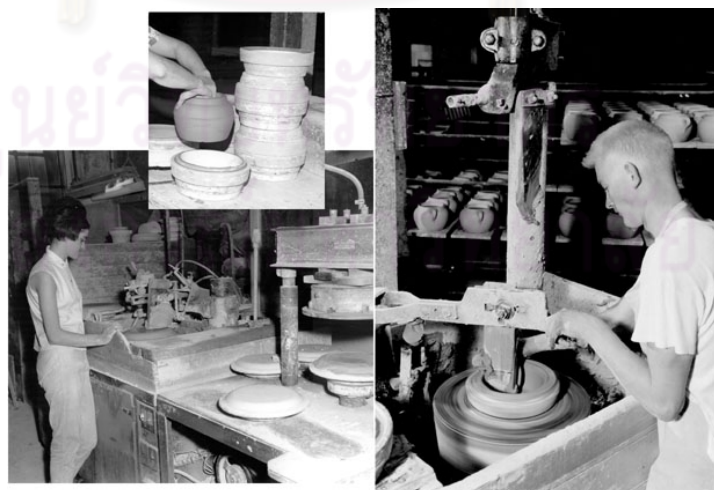
วิธีการขึ้นรูปแบบนี้ส่วนใหญ่จะมีรูปร่างของผลิตภัณฑ์เป็นทรงกลม เช่น แจกัน โดยมีขนาดและรูปร่างใกล้เคียงกัน เนื้อดินสำหรับการขึ้นรูปแบบนี้ต้องมีความเหนียวมาก เนื้อดินจะต้องมีความละเอียดมีการเกาะตัวดี เมื่อนำมาปั้นแล้วไม่เกิดการยุบตัวปริมาณน้ำในเนื้อดินที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปร้อยละ 20-25



รูปที่ 2.13 การขึ้นรูปโดยอาศัยแป้นหมุน

#### 2.10.2. การขึ้นรูปด้วยใบมีด (Jiggering)

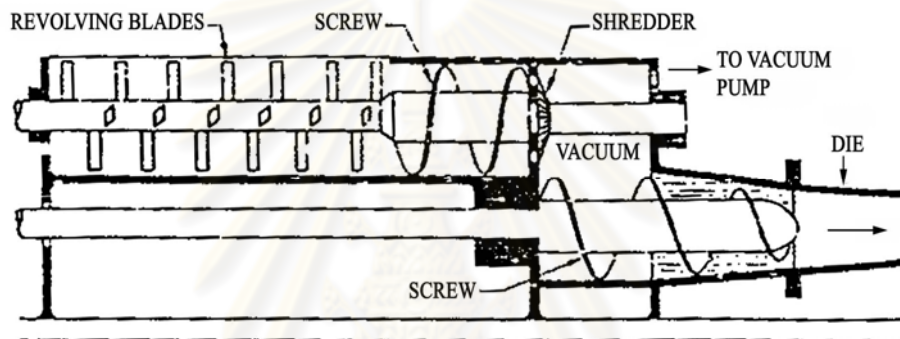
เป็นการขึ้นรูปที่ดัดแปลงมาจากการขึ้นรูปด้วยแป้นหมุนโดยใช้ใบมีดและแม่พิมพ์ที่ทำด้วยปูนปลาสเตอร์ คือวางเนื้อดินบนไว้บนแบบพลาสติกซึ่งติดอยู่กับแป้นหมุนแล้วกดแม่แบบอีกอันลงบนเนื้อดินนั้นจะได้ผลิตภัณฑ์ ซึ่งใบมีดมีแบบภายในสำหรับ การทำถ้วยกาแฟ และใบมีดภายนอกสำหรับการทำจาน ซามเป็นต้น วิธีการแบบนี้สามารถผลิตได้ปริมาณมากในเวลาที่รวดเร็ว ใช้ผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องการรูปร่างที่แน่นอน เนื้อดินที่ใช้ขึ้นรูปมีความเหนียวน้อยกว่าการขึ้นรูปแบบใช้แป้นหมุนเนื่องจากมีแม่พิมพ์บังคับในการขึ้นรูป ปริมาณน้ำที่ผสมเพื่อให้เหมาะสมในการขึ้นรูปอยู่ในช่วงร้อยละ 14- 15



รูปที่ 2.14 การขึ้นรูปด้วยใบมีด<sup>[23]</sup>

## 2.11. การขึ้นรูปด้วยการรีด (Extrusion)

เป็นการอัดเนื้อดินที่มีความเหนียวผ่านท่อโดยหัวรีดเป็นตัวกำหนดรูปแบบ เช่น แบบทรงกลม แท่งสี่เหลี่ยม เมื่อแท่งดินถูกรีดออกจะถูกตัดออกเป็นส่วนตามความยาวที่ต้องการ ในตัวเครื่องรีดจะมีสว่านแรงดันสูงและห้องสุญญากาศ เพื่อลดฟองอากาศเพื่อให้เป็นเนื้อเดียวกัน ทำให้เนื้อดินเป็นเนื้อเดียวกัน ผลิตภัณฑ์ที่ใช้การขึ้นรูปด้วยวิธีนี้เช่น อิฐก่อสร้าง ฉนวนไฟฟ้าท่อระบายน้ำ การรีดดินจะมีความเหนียวพอสมควร ปริมาณน้ำที่ผสมเพื่อให้เหมาะสมในการขึ้นรูปอยู่ในช่วงร้อยละ 15 -20



รูปที่ 2.15 เครื่องรีดสำหรับการขึ้นรูป<sup>[16]</sup>

## 2.12. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วิธีการควบคุมการเกิดคราบขาวในผลิตภัณฑ์ ด้วยการเติมแบเรียมคาร์บอเนตโดยปริมาณที่จะใช้คือ 2 เท่าของปริมาณซัลเฟตที่มีอยู่ในเนื้อดิน สำหรับบางกรณีมีคำแนะนำให้การเติมแบเรียมคาร์บอเนตเป็นปริมาณ 10 เท่า<sup>[2]</sup> และมีการศึกษาผลของขนาดอนุภาคและการไม่รวมเป็นก้อนของแบเรียมคาร์บอเนตต่อการควบคุมการเกิดคราบขาวพบว่าแบเรียมคาร์บอเนตที่มีอนุภาคขนาด 0.2 ถึง 1 ไมโครเมตรจะลอยตัวและกระจายตัวสม่ำเสมอทำให้สามารถป้องกันการเกิดคราบขาวได้ดี หากแบเรียมคาร์บอเนตที่มีอนุภาคขนาดใหญ่กว่าทำให้ป้องกันการเกิดคราบขาวได้ไม่ดีนัก<sup>[4]</sup>

ชลัย ศรีสุขได้ทำการทดลองเติมแบเรียมคาร์บอเนตในเนื้อดินปั้นราชบุรีมีในการยับยั้งการเกิดคราบขาวโดยการใช้ในปริมาณร้อยละ 1-1.25 ของเนื้อดินสามารถลดปริมาณซัลเฟตที่ละลายน้ำได้ และการใช้แบเรียมคลอไรด์ในปริมาณ ร้อยละ 0.75 - 1 แล้วนำชิ้นงานที่ควบคุมปริมาณซัลเฟตเผาที่อุณหภูมิ 1050 องศาเซลเซียสพบว่าไม่เกิดคราบสีขาวของเกลือซัลเฟต<sup>[24]</sup>



สิริพรรณและคณะ ได้ทำการศึกษาการโดยการเติมแบเรียมคาร์บอเนตหรือแบเรียมคลอไรด์ สำหรับแหล่งดินในจังหวัดอ่างทอง สามารถใช้ในการแก้ไขปัญหาคราบขาวได้โดยการเติมแบเรียมคลอไรด์ ซึ่งพบว่าปริมาณที่เหมาะสมอยู่ที่ร้อยละ 0.6 - 0.8 ซึ่งค่าความแข็งแรงจาก 12 เมกะพาสคัลเป็น 18.98 เมกะพาสคัล<sup>[25]</sup>

ธนากรและคณะ ได้ทำการศึกษาโดยการเติมโซเดียมคาร์บอเนตเติมลงในเนื้อดินราชบุรีในปริมาณร้อยละ 0.2 - 1 พบว่าสามารถลดคุณสมบัติการเผาผลิตภัณฑืลงได้ 50 -150 องศาเซลเซียส โดยสมบัติหลังการเผาเทียบเท่าผลิตภัณฑืเดิม<sup>[26]</sup>

ถึงแม้ว่าจะมีการแบเรียมคาร์บอเนตในการแก้ปัญหาคราบขาวแต่ว่าการใช้แบเรียมคาร์บอเนตยังมีปัญหาจากการใช้งาน เนื่องจากการทำปฏิกิริยาจะเกิดบริเวณผิวของอนุภาคของแบเรียมคาร์บอเนต การกระจายตัวของแบเรียมคาร์บอเนตในเนื้อดินให้สม่ำเสมอทำได้ยากเนื่องจากผงแบเรียมคาร์บอเนตมักจะรวมตัวกันเป็นก้อน รวมทั้งแบเรียมคาร์บอเนตในท้องตลาดมีการกระจายตัวและขนาดของอนุภาคไม่สม่ำเสมอมีอนุภาคขนาดใหญ่ปนอยู่มากทำให้ยุ่งยากในขั้นตอนการเตรียม

จากการค้นคว้าที่ผ่านมาของผู้วิจัยพบว่ายังไม่มีการใช้โซเดียมคาร์บอเนตในการยับยั้งการเกิดคราบขาว ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาผลของการเติมโซเดียมคาร์บอเนตในการยับยั้งการเกิดคราบขาวในดินราชบุรี และผลที่มีต่อสมบัติหลังการเผาของเนื้อดินปั้นราชบุรี

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

ดินเหนียวเนื้อสีแดงอิฐจากแหล่งในจังหวัดราชบุรี มาทำการทดลอง โดยปกติแล้ว ในการผลิตเครื่องปั้นดินเผาจากดินของชุมชนดังกล่าวจะมีการเติมทรายละเอียดจากแม่น้ำประมาณ 10 - 20 เปอร์เซ็นต์ แต่เพื่อที่จะศึกษาเฉพาะผลของโซเดียมคาร์บอเนตต่อเนื้อดินแหล่งดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงทำการทดลองเริ่มต้นโดยการไม่เติมทรายใช้ดินเหนียวเพียงอย่างเดียว

#### 3.1. วัตถุประสงค์และสารเคมี

ตาราง 3.1 แสดงสารเคมีและวัตถุประสงค์ที่ใช้ในการทดลอง

สารเคมี	ความบริสุทธิ์/ความเข้มข้น	บริษัทผู้ผลิต
ดินจากแหล่งดินราชบุรี	-	-
โซเดียมคาร์บอเนต	99.9 %	APS Finechem
แบเรียมคาร์บอเนต	99.9 %	APS Finechem
โซเดียมคลอไรด์	99.9 %	APS Finechem
โซเดียมฟอสเฟต	99.9 %	APS Finechem

#### 3.2. ขั้นตอนและวิธีการทดลอง

1. นำดินมาอบแห้งที่ 105 องศาเซลเซียส บดด้วยเครื่องบดหยาบ Jaw crusher แล้วบดละเอียดด้วยเครื่องบด Pulverizer ร้อนผ่านตะแกรงร่อนที่มีขนาด 35 เมช เพื่อเตรียมเป็นผงดินแห้งนำตัวอย่างดินไปวัดหาปริมาณและชนิดของไอออน โดยการเตรียมเนื้อดินผง 20 กรัมผสมน้ำกลั่น 400 มิลลิลิตร บดในเครื่องบด 30 นาที หลังจากนั้นนำมากรองด้วยเครื่องบารลรอยด์ฟิลเตอร์ แสดงดังรูปที่ 3.1 ด้วยแรงดัน 0.4 psi ผ่านกระดาษกรองเบอร์ 42 (ขนาด 2.5 ไมโครเมตร) เพื่อไม่ให้สารละลายขุ่นและเกิดการผิดพลาดในการวิเคราะห์ จะต้องรินสารละลาย 5 มิลลิลิตรแรกทิ้ง แล้วจึงทำการกรองต่อไป (ตามมาตรฐาน ASTM C867-94) แล้วนำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณไอออนด้วยเครื่อง Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุใน ระดับต่ำ เทคนิค ICP-MS ใช้หลักการวัดมวลสารที่แตกต่างกันของธาตุที่ต้องการวิเคราะห์ โดยใช้พลาสมาในการผลิตไอออนของธาตุ เครื่องมือจะมีแหล่งกำเนิดพลาสมาซึ่งเป็นเปลวความร้อนสูง (6000 – 10000 เคลวิน) เกิดจากชน

กันของอนุภาคอาร์กอนที่แตกตัวโดยการเร่งพลังงานด้วยสนามแม่เหล็กและขดลวดทองแดง (Inductive Coupling) ทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดพลังงานที่ทำให้ธาตุในตัวอย่างที่ผ่านการสเปร์ย์ให้เป็นละอองฝอยถูกเผาให้แตกตัวกลายเป็นไอออนประจุ +1 และส่งผ่านไป เพื่อทำการแยกตามน้ำหนักมวลสารในแต่ละธาตุและตรวจวัดหาปริมาณด้วยการเปลี่ยนเป็นสัญญาณไฟฟ้าเทคนิค ICP-MS เป็นเทคนิคการวิเคราะห์ในระดับต่ำมาก (Ultra trace Analysis) ที่รวดเร็ว ลักษณะของเทคนิคสามารถวิเคราะห์ธาตุในตัวอย่างได้มากกว่า 1 ธาตุในการวิเคราะห์แต่ละครั้ง (Multi-Element Analysis) สามารถควบคุมสิ่งรบกวนที่เกิดขึ้นได้โดยใช้เทคโนโลยีต่าง ๆ มีช่วงความเข้มข้นของการสร้าง Calibration curve ค่อนข้างกว้าง ทำให้ ICP-MS ได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วงหลังสามารถนำไปใช้งานได้หลากหลายสายงานเช่น งานทางสิ่งแวดล้อม เกษตรและอาหาร การแพทย์และเภสัชกรรม ธรณีวิทยา งานศึกษาวิจัยและอุตสาหกรรมต่าง ๆ อาทิเช่น อุตสาหกรรมเคมีคอนดักเตอร์งานวัสดุศาสตร์ที่ต้องการความบริสุทธิ์สูง ดังแสดงรูปที่ 3.2

2. นำตัวอย่างดินแห้งผงดินแห้งผสมน้ำกลั่นโดยให้มีความชื้นร้อยละ 22 นำมาขนาดผสมให้เข้ากันด้วยมือในภาดอะลูมิเนียม (สวมถุงมือยางขณะนวดเพื่อป้องกันการปนเปื้อนของเกลือจากมือ) บรรจุเนื้อดินนั้นในถุงพลาสติกป้องกันการระเหยของน้ำ แล้วหมักไว้ในถุงพลาสติกหมักไว้ 24 ชั่วโมง. เพื่อให้เกลือและไอออนต่างๆ ในดินละลายได้ดีหลังจากนั้นทำการแบ่งเนื้อดินเป็นส่วน



รูปที่ 3.1 เครื่องบาร์ลอยด์ฟิลเตอร์



รูปที่ 3.2 เครื่อง Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS)



รูปที่ 3.3 การนวดดินและการหมักดินในถุงพลาสติก

2.1 นำมานวดบนแผ่นพลาสติกให้เป็นแผ่นกลมแบน หนาประมาณ 1 เซนติเมตร และมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 35 เซนติเมตร (พื้นที่หน้าตัดประมาณ 1000 ตารางเซนติเมตร) ห่อหุ้มด้านข้างของเนื้อดินปั้นด้วยฟิล์มพลาสติกเพื่อควบคุมให้เกิดการระเหยของน้ำเฉพาะที่ ผิวหน้าเท่านั้นผึ่งไว้ในที่ร่มเป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นนำไปอบแห้งที่ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทำการชูดผิวด้านบนของแผ่นกลมโดยมีความลึกประมาณ 1 มิลลิเมตร นำเนื้อดิน

ที่ได้จากการขูดมาบดให้ละเอียดแล้วร่อนผ่านตะแกรง 35 เมช เพื่อให้ได้เป็นผงดินนำไปปั่นผสม น้ำกลั่นโดยใช้เนื้อดินน้ำหนัก 20 กรัม ต่อน้ำกลั่น 400 กรัม ปั่นนาน 30 นาที ทำการกรองด้วย เครื่องบาร์ลรอยด์ฟิลเตอร์ด้วยแรงดัน 100 psi เพื่อไม่ให้สารละลายขุ่นและเกิดการผิดพลาดในการ วิเคราะห์ จะต้องรินสารละลาย 5 มิลลิลิตรแรกทิ้ง แล้วจึงทำการกรองต่อไปนำสารละลายที่ได้ไป วิเคราะห์ชนิดและปริมาณไอออนบริเวณผิวด้านบนของชิ้นงานด้วยเครื่อง Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS)

2.2 นำมาขึ้นรูปเป็นเหรียญให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 35 มิลลิเมตร โดยใช้ แม่พิมพ์โลหะและใช้เนื้อดินปั้นประมาณ 20 กรัมอัดขึ้นรูปโดยใช้แรงดันไฮดรอลิกที่ความดันต่ำ เพียง 2 เมกะพาสคัล โดยไม่ใช้น้ำมันทาแม่พิมพ์หรือใช้น้อยที่สุดเพื่อป้องกันเนื้อดินติดแม่พิมพ์ ห่อหุ้มด้านข้างของเนื้อดินปั้นด้วยฟิล์มพลาสติกเพื่อควบคุมให้เกิดการระเหยของน้ำเฉพาะที่ ผิวหน้าด้านบนของชิ้นงานเท่านั้น นำมาผึ่งให้แห้งในห้องทดลองเป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นนำไป อบแห้งในเตาอบที่ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำชิ้นงานรูปเหรียญเผาในเตาเผา ไฟฟ้าที่อุณหภูมิตั้งแต่ 850 900 และ 950 องศาเซลเซียส อัตราเร็วในการเพิ่มอุณหภูมิ 5 องศา- เซลเซียสต่ออนาทีและคงอุณหภูมิไว้ที่จุดสูงสุดเป็นเวลา 60 นาที นำตัวอย่างหลังการเผา วัดค่าการ เปลี่ยนแปลงของสีและหาองค์ประกอบของแร่



รูปที่ 3.4 แผ่นชิ้นงานกลมขนาด 35 มิลลิเมตร ผึ่งไว้ที่อุณหภูมิห้อง

2.3 นำมาขึ้นรูปด้วยการอัดรีดออกจากหัวแม่แบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร ให้เป็นแท่งดินทดสอบดังแสดงรูปที่ 3.5 ผึ่งขึ้นงานดินให้แห้งในอากาศเป็นเวลา 48 ชั่วโมงดังแสดงรูปที่ 3.6 แล้วอบแห้งในเตาอบที่ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำแท่งขึ้นงานเผาในเตาเผาไฟฟ้าที่อุณหภูมิตั้งแต่ 850 900 และ 950 องศาเซลเซียส อัตราเร็วในการเพิ่มอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที และคงอุณหภูมิไว้ที่จุดสูงสุดเป็นเวลา 60 นาที ทำการวัดหาค่าการดูดซึมน้ำ ความแข็งแรง ตัวอย่างละ 5 ชิ้น

2.4 นำเนื้อดินปั้นที่ได้ทำมาทดสอบความเหนียวด้วยเครื่อง Pfefferkorn plastic test ทำการทดลองซ้ำตามข้อ 2 ด้วยทำการเติมโซเดียมคาร์บอเนตในเนื้อดินโดยใช้ปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก นอกจากนี้ ยังจะทำการทดลองเพิ่มเติมโดยการใส่ แบเรียมคาร์บอเนต โซเดียมคลอไรด์ และโซเดียมฟอสเฟต เพื่อเปรียบเทียบสมบัติต่างๆ

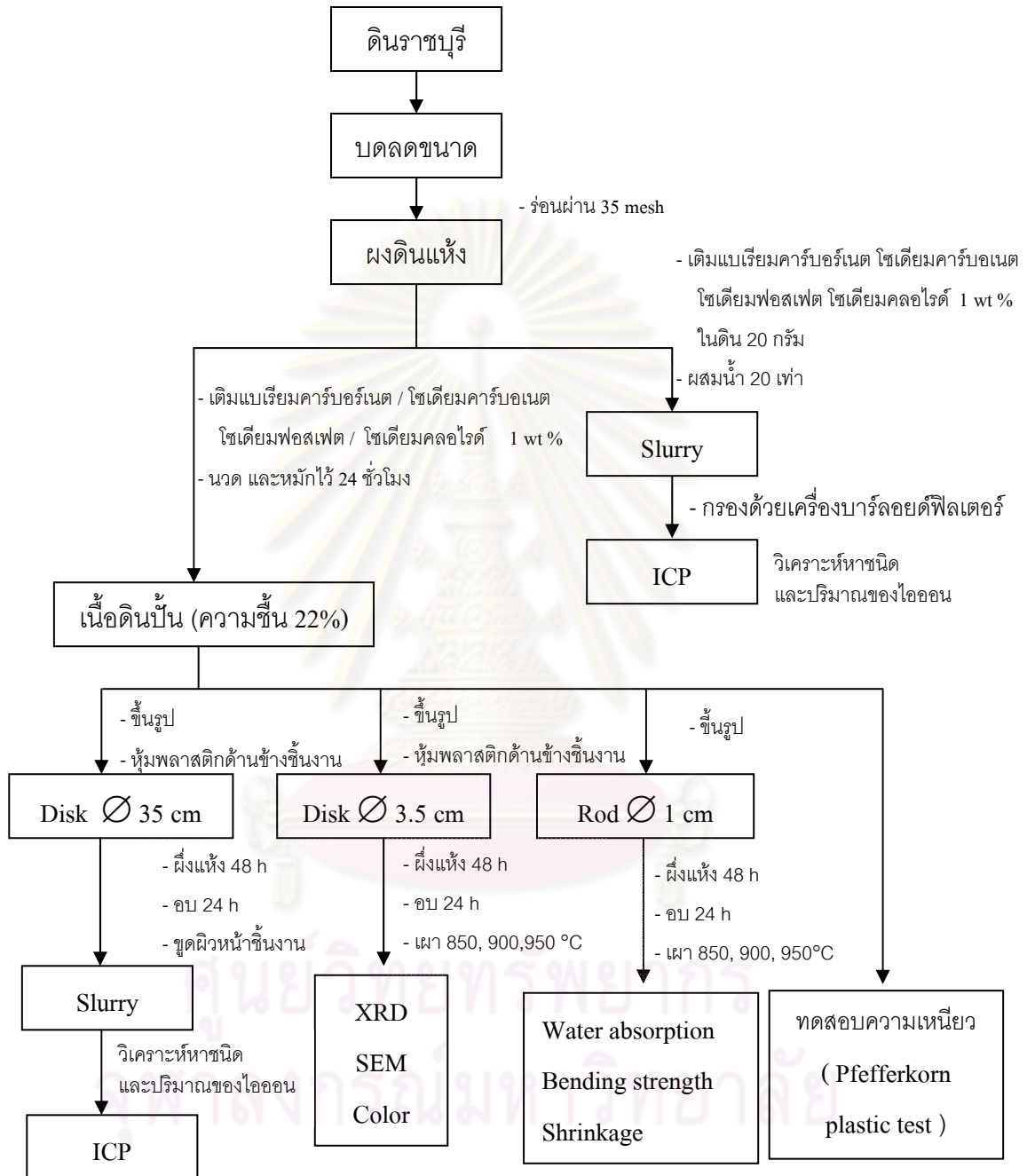


รูปที่ 3.5 การขึ้นรูปแท่งดินทดสอบ



รูปที่ 3.6 รูปแบ่งดินหลังจากรีดนำมาฝังไว้ในห้องทดลอง

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



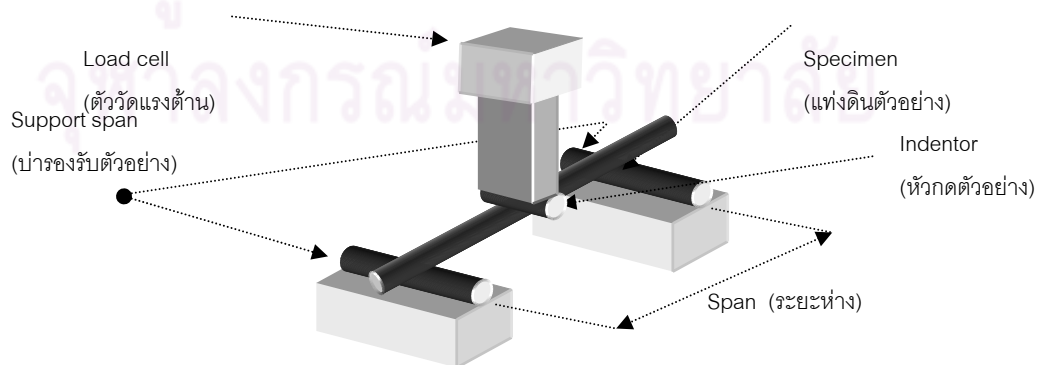
รูปที่ 3.7 แผนภาพกระบวนการทดลอง



การวิเคราะห์สมบัติของตัวอย่าง

ตัวอย่างที่ได้จะนำมาวิเคราะห์สมบัติต่างๆ ดังนี้

1. การวิเคราะห์องค์ประกอบและโครงสร้างผลึกโดยใช้เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์ (XRD) รุ่น Exspert ผลิตโดยบริษัท Phillip โดยใช้หลอด Cu-tube ด้วยอัตรา 2 องศาต่อวินาที ศึกษาในช่วง  $2\theta = 10-80^\circ$  เพื่อศึกษาองค์ประกอบเชิงแร่ของเนื้อดินสำหรับในเนื้อดินทำการวัดโดยการเตรียมเป็นผงดินที่ได้จากการร่อนผ่านตะแกรง 35 เมช สำหรับการวิเคราะห์บริเวณผิวหน้าของชิ้นงาน ทำการวัดชิ้นงานที่ขึ้นรูปเป็นเหรียญขนาด 35 มิลลิเมตร ทำการวัดก่อนเผาและหลังการเผาที่อุณหภูมิ 850 900 และ 950 องศาเซลเซียส
2. การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) รุ่น XL304P ผลิตโดยบริษัท Phillip ประเทศญี่ปุ่น โดยใช้ ความต่างศักย์ (voltage) 15 kV เพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาค ทำการวัดชิ้นงานที่ขึ้นรูปเป็นเหรียญขนาด 35 มิลลิเมตรทำการวัดก่อนและหลังการเผาที่อุณหภูมิ 850 900 และ 950 องศาเซลเซียส ก่อนการวัดทำการเคลือบผิวหน้าชิ้นงานด้วยไอออนทองคำ โดยใช้เครื่องเคลือบผิว (Spottering)
3. การวิเคราะห์ชนิดและปริมาณของไอออน ของเนื้อดินตัวอย่างและบริเวณผิวของตัวอย่างด้วยเครื่อง Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry รุ่น VISTA-MPX ผลิตโดยบริษัท VARIAN ทำการวัดตัวอย่างของสารละลายที่ได้จากการกรองด้วยเครื่องบารอยด์ฟิลเตอร์
4. การทดสอบการเปลี่ยนสีหลังเผาที่อุณหภูมิ 850 900 และ 950 องศาเซลเซียส โดยใช้เครื่อง Chromameter CR200 ผลิตโดยบริษัท Minolta วัดสีการเปลี่ยนแปลงของชิ้นงาน
5. การทดสอบความแข็งแรง<sup>[27]</sup> (strength) หลังอบแห้งและหลังเผาของแท่งดินทดสอบ โดยใช้เครื่องทดสอบความแข็งแรงของวัสดุ รุ่น Model 5583 ผลิตโดยบริษัท Instron



รูปที่ 3.8 การทดสอบความแข็งแรง Three point bending

นำค่าแรง P ที่จุดแตกหัก ไปใช้ในการคำนวณ หาค่า MOR ผลที่ได้ก็ขึ้นอยู่กับแบ่งดิน ตัวอย่างโดยใช้สูตรต่างกัันดังนี้

$$MOR = \frac{8PL}{\pi d^3}$$

P = ค่าแรงที่จุดแตกหัก

L = ระยะห่างจุดรองรับตัวอย่าง (span)

d = เส้นผ่าศูนย์กลางตัวอย่าง

7. การทดสอบการหดตัว (shrinkage) <sup>[28]</sup> หลังอบแห้งและหลังเผา

โดยใช้วิธีดังนี้

- 1) วัดความยาวของแท่งดินรีดก่อนอบแห้ง ( $L_1$ )
- 2) วัดความยาวของแท่งดินหลังอบแห้ง ( $L_2$ )
- 3) นำไปคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การหดตัวหลังอบแห้งหรือหลังเผาตามสูตร

$$\text{ร้อยละของการหดตัวหลังอบแห้ง} = \frac{L_1 - L_2}{L_1} \times 100$$

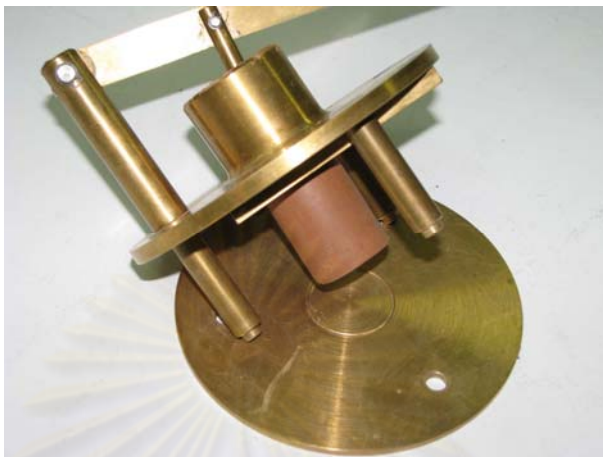
$$\text{ร้อยละของการหดตัวรวมหลังเผา} = \frac{L_p - L_f}{L_1} \times 100$$

โดยที่  $L_p$  = ความยาวของแท่งดินรีดก่อนอบ  
 $L_f$  = ความยาวของแท่งดินหลังเผา

8. วัดการดูดซึมน้ำ

การหาค่าการดูดซึมน้ำ <sup>[29]</sup> ด้วยวิธีการต้มในน้ำเดือดเป็นเวลา 5 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นตัว แล้วชั่งน้ำหนักเปียก

9. การวัดค่าสัมประสิทธิ์ของความเหนียวโดยใช้เครื่อง Pfefferkorn Plasticity test ประกอบด้วยตัวเครื่องและอุปกรณ์สำหรับการเตรียมชิ้นงานทดสอบ ทำการเตรียมชิ้นงานโดยเนื้อดินที่มีความชื้นร้อยละ 22 ขึ้นรูปเป็นทรงกระบอกเส้นผ่าศูนย์กลาง 33 มิลลิเมตรความสูง 40 มิลลิเมตร ดังแสดงรูปที่ 3.9 จากนั้นนำไปใส่ในเครื่อง Pfefferkorn Plasticity test เพื่อทำการทดสอบความเหนียวของเนื้อดิน โดยยกแผ่นสำหรับตี (rammer) ขึ้นสูงสุดแล้วปล่อยให้ตกกระทบกับชิ้นงานตัวอย่าง ดังแสดงรูปที่ 3.10 และอ่านค่าจะสเกลมิลลิเมตรวัดค่าความสูงที่ได้ หรืออ่านจากค่าที่เป็นสเกลค่าสัมประสิทธิ์ของความเหนียว จากนั้นนำชิ้นงานไปวัดความชื้น



รูปที่ 3.9 การเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบ



รูปที่ 3.10 การทำการทดสอบของเครื่อง Pfefferkorn plastic test

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผล

#### 4.1. สมบัติของดินราชบุรี

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเนื้อดินราชบุรี ซึ่งมีผลทำให้เกิดผลต่างๆ ในการขึ้นรูปและการเผา ประกอบด้วยซิลิการ้อยละ 62.98 อะลูมินาร้อยละ 17.94 เป็นตัวสำคัญทำให้เนื้อดินหลังเผามีความแข็งแรง และทนไฟ เนื้อดินมีทรายปนมาก เหล็กออกไซด์ร้อยละ 4.14 และไทเทเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 1.04 จะทำให้เกิดสีเข้มขึ้น โพลแทสเซียมออกไซด์ โซเดียมออกไซด์ และแมกนีเซียมออกไซด์ รวมกันไม่สูงนัก เป็นสารช่วยลดจุดหลอมเหลว (fluxing agent) ซึ่งทำให้ช่วยเกิดเนื้อแก้วในผลิตภัณฑ์ การสูญเสียน้ำหนักทางความร้อนร้อยละ 10.54 แสดงว่ามีสารอินทรีย์ปนอยู่ค่อนข้างต่ำ รวมถึงสารประกอบซัลเฟต และไฮเดรตอื่นๆ ด้วย องค์ประกอบทางแร่หลักคือควอตซ์ และพบแร่เคลไอลีนที่ซึ่งเป็นแร่ดินหลักของดินราชบุรี

#### ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของดินราชบุรี

องค์ประกอบทางเคมี (wt%)										
SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	L.O.I.
62.98	17.94	4.14	0.52	0.56	0.16	1.10	1.04	0.01	0.05	10.54

#### 4.2. องค์ประกอบของเกลือละลายน้ำได้ในดินเฉพาะบริเวณผิวหน้าของดินราชบุรี

จากตารางที่ 4.2 ผลวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry ไอออนที่พบในเนื้อดินได้แก่ แบเรียมไอออน (Ba<sup>2+</sup>) แคลเซียมไอออน (Ca<sup>2+</sup>) ซัลเฟตไอออน (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) และ โซเดียมไอออน (Na<sup>+</sup>) โพแทสเซียมไอออน (K<sup>+</sup>) แมกนีเซียม (Mg<sup>2+</sup>) เป็นส่วนประกอบของดินโดยทั่วไป ไอออนที่สนใจนั้นได้แก่ แคลเซียมไอออน โซเดียมไอออน Na<sup>+</sup> และ ซัลเฟตไอออน ในเนื้อดินราชบุรีพบว่ามีแคลเซียมไอออน 460 หนึ่งส่วนในล้านส่วน (ppm) และ ซัลเฟตไอออน (1,481 ppm) บริเวณพื้นผิวด้านบนของชิ้นงานมีค่าเพิ่มขึ้นแคลเซียมไอออน (2,722 ppm) และซัลเฟตไอออน (5,627 ppm) ตามลำดับซึ่งคาดว่าคราบขาวนั้นเกิดจากแคลเซียมไอออนและซัลเฟตไอออน ซึ่งอยู่ในรูปของแคลเซียมซัลเฟต

ในกรณีของการเติมด้วยแบเรียมคาร์บอเนต บริเวณพื้นผิวด้านบนของชิ้นงานปริมาณของแคลเซียมไอออน (139 ppm) และซัลเฟตไอออน (117 ppm) ลดลงมาก ซึ่งเป็นการทำปฏิกิริยา

ของแบเรียมคาร์บอเนตกับแคลเซียมซัลเฟตได้เป็นแบเรียมซัลเฟต ( $\text{BaSO}_4$ ) ซึ่งมีค่าการละลายน้ำต่ำ (22 ไมโครกรัมต่อน้ำ 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร) จึงไม่สามารถละลายออกมาที่บริเวณผิวด้านบนของชิ้นงาน

ในกรณีของการเติมด้วยโซเดียมคาร์บอเนตบริเวณพื้นผิวด้านบนของชิ้นงานไอออน  $\text{Ca}^{2+}$  (368 ppm) มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับตัวดินราชบุรีแต่โซเดียมไอออน (7,555 ppm) และซัลเฟตไอออน (14,355 ppm) มีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งคาดว่าอยู่ในรูปของโซเดียมซัลเฟตซึ่งละลายและแพร่ขึ้นมาที่บริเวณผิวด้านบนของชิ้นงาน โซเดียมซัลเฟตจะสลายตัวเป็นโซเดียมออกไซด์ ( $\text{NaO}$ ) ที่อุณหภูมิ 600-1000 องศาเซลเซียส ซึ่งทำหน้าที่เป็นฟลักซ์ช่วยลดอุณหภูมิการเผา

กรณีชิ้นงานที่เติมโซเดียมคลอไรด์หรือชิ้นงานที่เติมโซเดียมฟอสเฟตบริเวณพื้นผิวของชิ้นงานมีค่าโซเดียมไอออน 7,110 ppm และ 4,276 ppm ตามลำดับซึ่งมีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับดินราชบุรีซึ่งคาดว่าบางส่วนอยู่ในรูปของโซเดียมซัลเฟต

อย่างไรก็ตามชิ้นงานที่เติมโซเดียมคลอไรด์หรือชิ้นงานที่เติมโซเดียมฟอสเฟตมีค่าของแคลเซียมไอออน 2,822 ppm, 2,553 ppm และค่าของซัลเฟตไอออน 6,205 ppm , 13,456 ppm ตามลำดับ ทำให้การเติมโซเดียมคลอไรด์หรือโซเดียมฟอสเฟต ทำให้ผลการป้องกันการเกิดคราบขาวไม่ดี เนื่องจากมีปริมาณของแคลเซียมไอออนและซัลเฟตไอออนที่อยู่ในรูปของแคลเซียมซัลเฟต

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

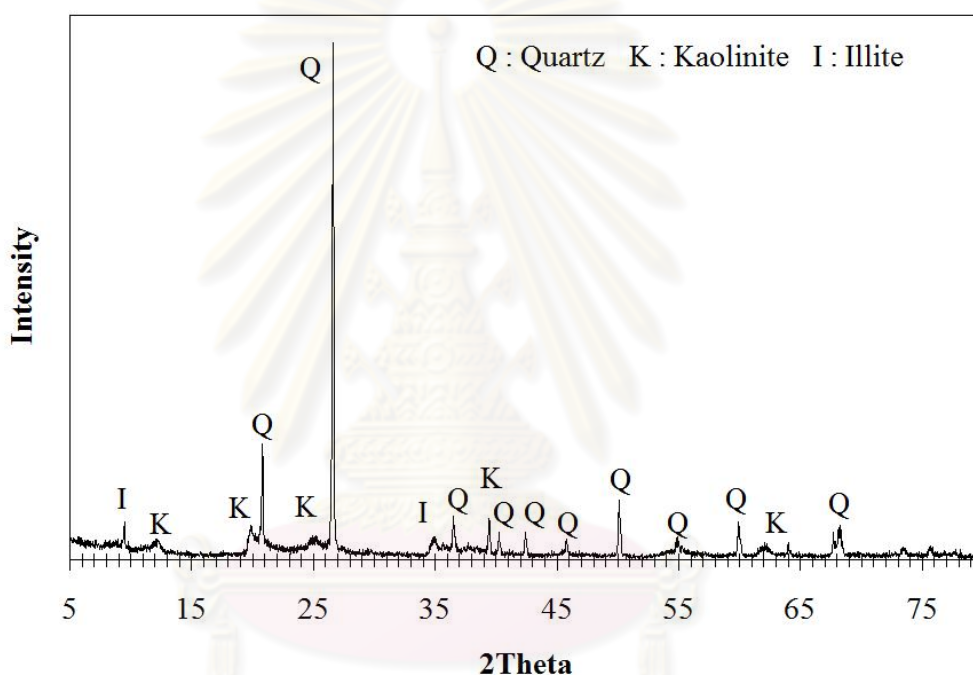
ตารางที่ 4.2 ชนิดและปริมาณของไอออนต่างๆ ที่ละลายน้ำได้ในเนื้อดินและบริเวณผิว (ppm) และผลของการเติมเกลือชนิดต่างๆ

Ion	ดินราชบุรี		1 % แบริยมคาร์บอเนต		1 % โซเดียมคาร์บอเนต		1 % โซเดียมคลอไรด์		1 % โซเดียมฟอสเฟต	
	เนื้อดิน	พื้นผิว	เนื้อดิน	พื้นผิว	เนื้อดิน	พื้นผิว	เนื้อดิน	พื้นผิว	เนื้อดิน	พื้นผิว
Ba <sup>2+</sup>	20	20	34	55	20	20	20	20	20	20
Ca <sup>2+</sup>	460	1,481	65	139	41	368	596	2,822	114	2,553
Mg <sup>2+</sup>	163	402	163	33	20	38	207	763	41	682
K <sup>+</sup>	117	122	59	61	45	61	115	117	58	106
Na <sup>+</sup>	862	864	583	833	4,328	7,555	4,516	7,110	2,504	4,276
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	20	20	20	20	20	20	20	20	3,226	1,786
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	2,722	5,627	120	117	3,233	14,355	2,552	6,205	3,101	13,456
Cl <sup>-</sup>	63	119	62	178	78	102	1,293	2,656	76	279

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 4.3. องค์ประกอบทางเฟสของตัวอย่างก่อนและหลังเผา

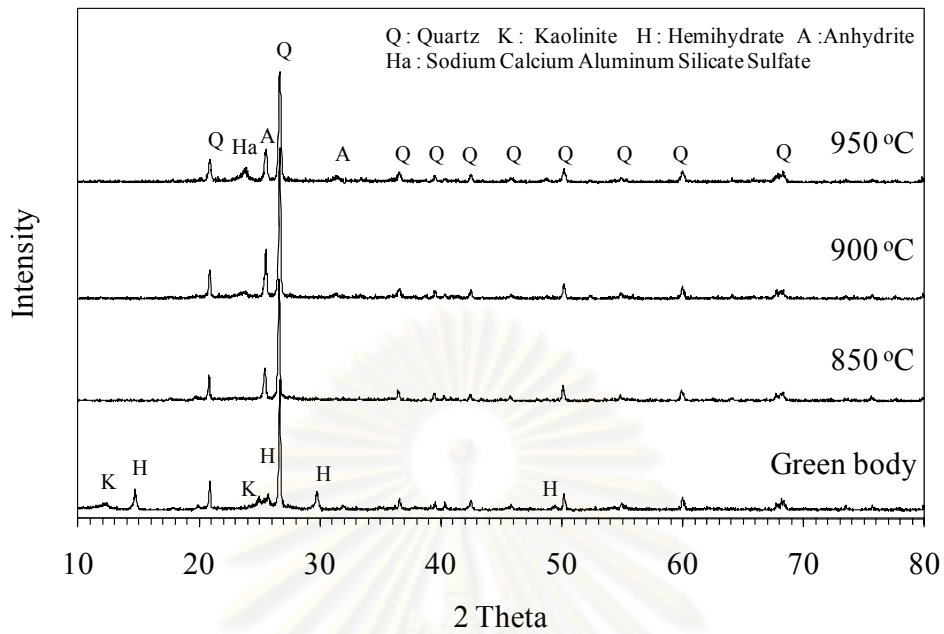
องค์ประกอบทางเฟสของเนื้อดินราชบุรี ประกอบด้วยควอตซ์ (Quartz) และแร่ดินเหนียวที่พบได้แก่ เคโอลิไนท์ (Kaolinite) อิลไลต์ เป็นแร่ที่พบในดินเหนียว สำหรับแร่ เคโอลิไนท์ ซึ่งเกิดจากการที่โครงสร้างของผลึกถูกแทนที่ตำแหน่งของซิลิกอนด้วยประจุบวกอื่นๆ จะมีความไม่เสถียรและมีอนุภาคขนาดเล็กกว่าเคโอลิไนท์ ที่ไม่ถูกแทนที่ด้วยไอออนอื่นๆ ขณะที่อิลไลต์เป็นแร่ดินที่มีขนาดเล็กทำให้เนื้อดินมีความละเอียด



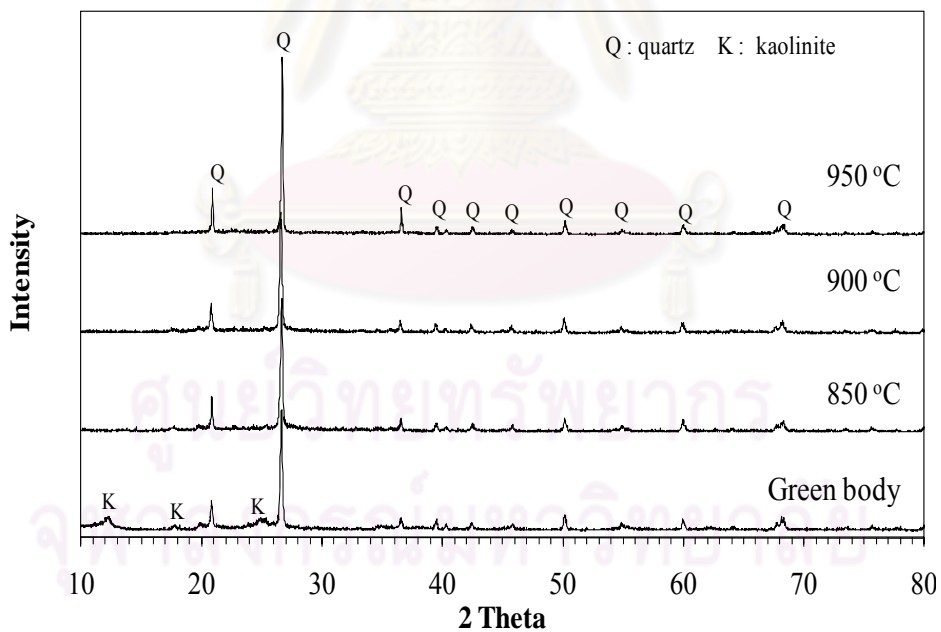
รูปที่ 4.1 กราฟการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ขององค์ประกอบเชิงแร่ของผงดินราชบุรี

บริเวณผิวด้านบนของดินราชบุรีดังแสดงรูปที่ 4.2 ชั้นงานก่อนการเผามีควอตซ์เป็นองค์ประกอบหลัก รองลงมาเป็นเคโอลิไนท์ และเฮมิไฮเดรต ( $\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$ ) ซึ่งเป็นเกลือซัลเฟตที่แพร่ขึ้นมาบนผิวและตกตะกอน ชั้นงานหลังการเผา 850 900 และ 950 องศาเซลเซียส มีแอนไฮไดรต์ ( $\text{CaSO}_4$ ) ที่เกิดจากการสลายตัวของเฮมิไฮเดรต และยังพบโซเดียมแคลเซียมอะลูมิโนซิลิเกตซัลเฟต ( $\text{Na}_6\text{Ca}_2\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24}(\text{SO}_4)_2$ ) เนื่องจากปริมาณไอออนของโซเดียมและปริมาณแคลเซียมไอออน

ส่วนผิวด้านล่างดินราชบุรีดังแสดงรูปที่ 4.3 พบควอตซ์เป็นหลักรองลงมาเป็นเคโอลิไนท์ ในชั้นงานก่อนเผาไม่พบแอนไฮไดรต์ ซึ่งเป็นการยืนยันว่าคราบขาวที่ปรากฏบนผิวของชั้นงานเกิดจากแคลเซียมซัลเฟต



รูปที่ 4.2 การเปลี่ยนแปลงของรังสีเอกซ์ของค้ประกอบเชิงแร่ของผิวด้านบนของดินราชบุรี

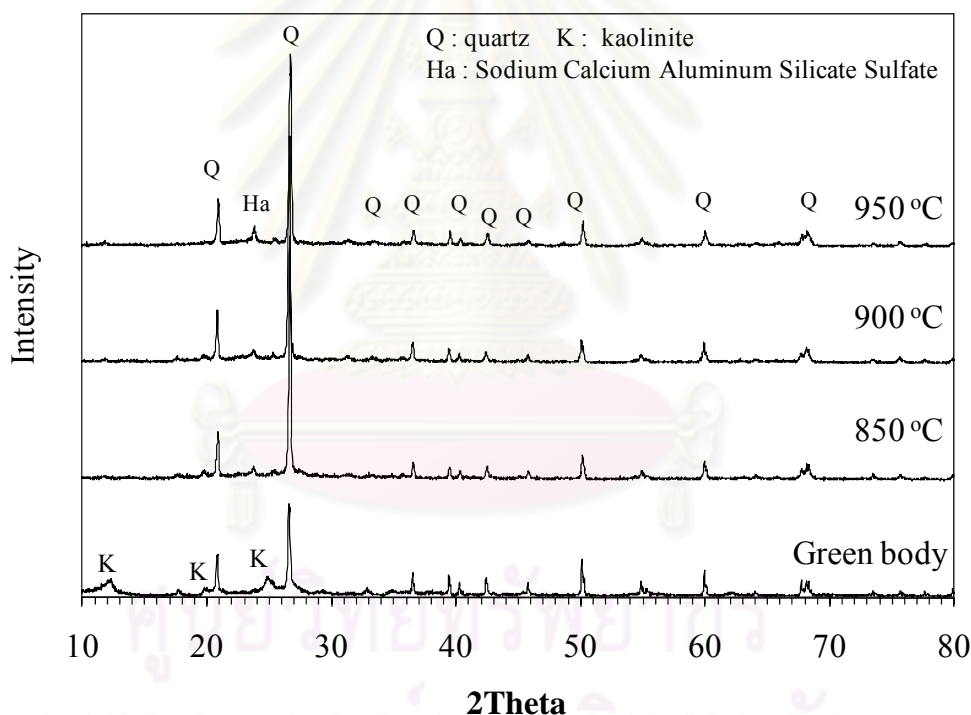


รูปที่ 4.3 การเปลี่ยนแปลงของรังสีเอกซ์ของค้ประกอบเชิงแร่ของผิวด้านล่างของดินราชบุรี

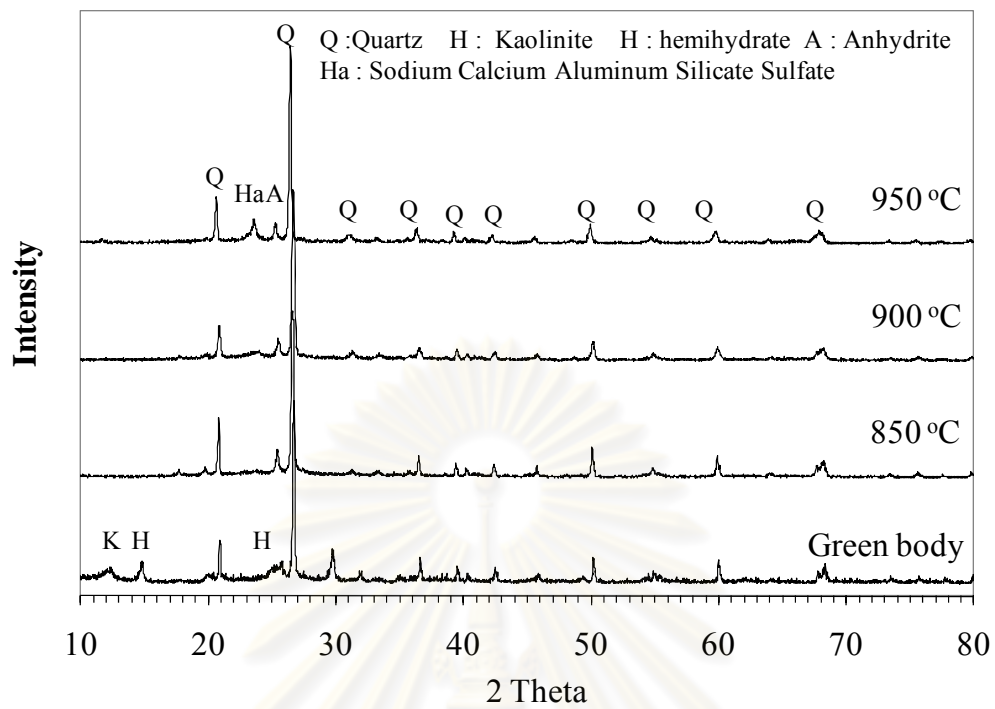


บริเวณผิวด้านบนของดินราชบุรีเดิมด้วยแบเรียมคาร์บอเนต ดังแสดงรูปที่ 4.4 ซึ่งงานก่อนเผาไม่พบเฟสของเฮมิไฮเดรต ซึ่งงานหลังการเผา 850 900 และ 950 องศาเซลเซียสพบไฮเดียมแคลเซียมอะลูมิเนียมโนซิลิเกตซัลเฟต เนื่องจากยังมีปริมาณของไฮเดียมไอออนและปริมาณของแคลเซียมไอออนอยู่นั่นเอง

ในการถนับริเวณผิวด้านบนของดินราชบุรีเดิมด้วยไฮเดียมคาร์บอเนต ดังแสดงรูปที่ 4.5 ซึ่งงานก่อนเผามีลักษณะที่เหมือนกับการเติมด้วยแบเรียมคาร์บอเนต แต่แตกต่างกันคือยังพบเฮมิไฮเดรตและซึ่งงานหลังเผาพบแอนไฮไดรต์ เนื่องจากยังพบปริมาณของแคลเซียมไอออน (368 ppm) ซึ่งมีความมากกว่าการเติมด้วยแบเรียมคาร์บอเนต (139 ppm) และพบไฮเดียม-แคลเซียมอะลูมิเนียมโนซิลิเกตซัลเฟต เนื่องจากปริมาณของไฮเดียมไอออน (7,555 ppm) และแคลเซียมไอออนที่บริเวณผิวด้านบนของซึ่งงาน



รูปที่ 4.4 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของคัพระกอบเชิงแร่ของผิวหน้าดินราชบุรีผสมแบเรียมคาร์บอเนต

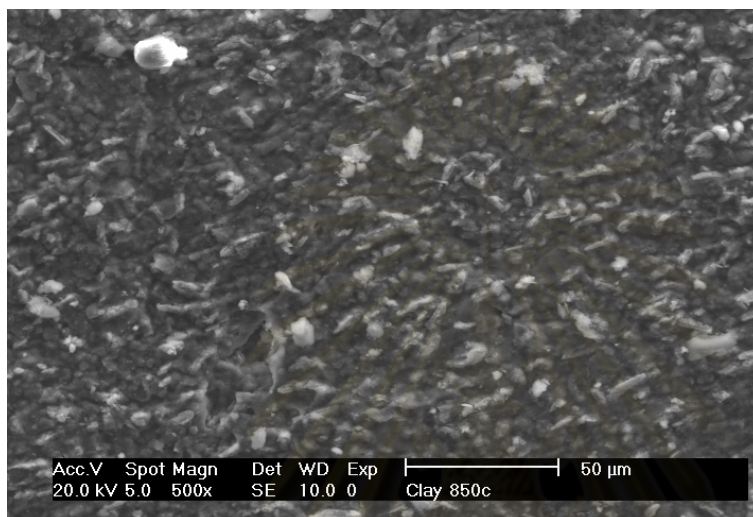


รูปที่ 4.5 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของค้ประกอบเชิงแร่ของผิวหน้าดินราชบุรีผสมโซเดียมคาร์บอเนต

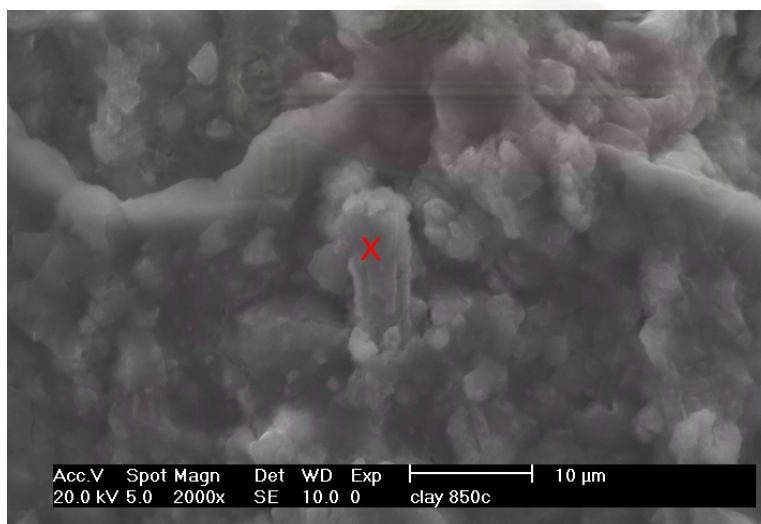
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 4.4. โครงสร้างจุลภาค

พื้นผิวของดินราชบุรีเผาที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส มีพื้นผิวดังแสดงรูปที่ 4.6(ก) เมื่อเพิ่มกำลังขยายเป็น 2000 เท่า พบว่าในบางบริเวณพบผลึกของแอนไฮไดรต์ซึ่งยืนยันได้จากองค์ประกอบทางเคมีด้วยการวิเคราะห์ EDX ของเครื่อง SEM ดังแสดงในรูปที่ 4.6(ข)



(ก)

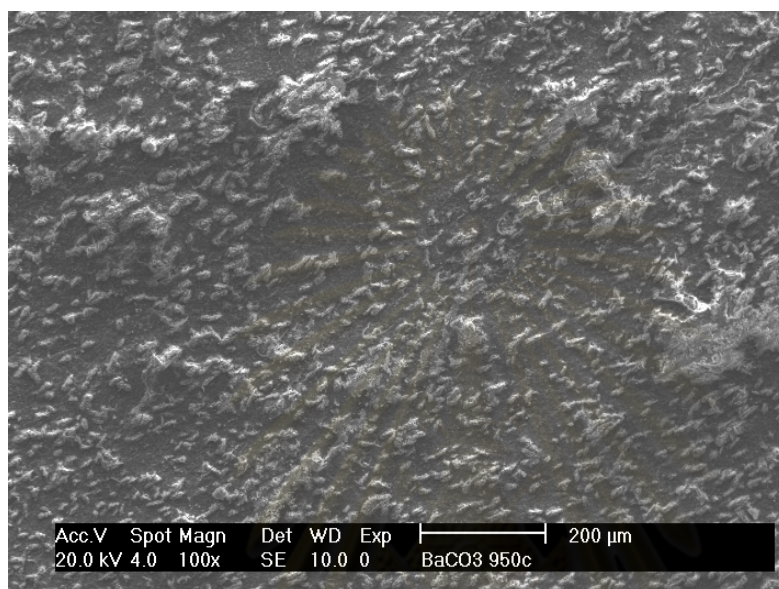


(ข)

Element	Wt %
O	46.36
Al	2.92
Si	4.49
S	20.63
Ca	24.89
Fe	0.72

รูปที่ 4.6 ภาพขยายผิวด้านบนของดินราชบุรีหลังเผา 850 °C

ผิวหน้าของดินราชบุรีที่เติมสารแบเรียมคาร์บอเนตที่ 950 องศาเซลเซียสมีผิว ดังแสดงรูปที่ 4.7(ก) เมื่อเพิ่มกำลังขยายเป็น 1000 เท่าพบสารแบเรียมคาร์บอเนตบางส่วนที่คงอยู่เนื่องจากความสามารถในการละลายน้ำได้ต่ำ (2200 ไมโครกรัมต่อน้ำ 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร) ซึ่งยืนยันองค์ประกอบทางเคมี ด้วยการวิเคราะห์ EDX ของเครื่อง SEM ดังแสดงในรูปที่ 4.7(ข)



(ก)

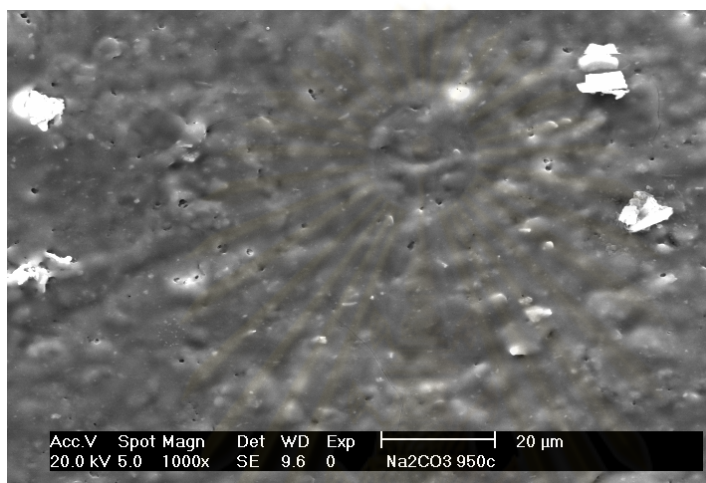


(ข)

Element	Wt %
O	31.67
Al	9.02
Si	13.71
S	7.89
K	0.44
Ca	0.85
Ba	34.97
Fe	1.44

รูปที่ 4.7 ผิวหน้าของดินราชบุรีผสมแบเรียมคาร์บอเนตหลังเผา 950 °C

ในกรณีของดินราชบุรีเติมด้วยโซเดียมคาร์บอเนตนั้นมีผิวดังแสดงในที่ 4.8(ก) มีความเป็นเนื้อแก้วมากกว่าดินราชบุรีเติมแบเรียมคาร์บอเนตเนื่องผลของโซเดียมออกไซด์ที่ทำหน้าที่เป็นฟลักซ์ที่ได้จากการสลายตัวของโซเดียมซัลเฟต พื้นผิวบางส่วนมีรอยแตกที่เกิดจากการหดตัว เมื่อทำการเพิ่มกำลังขยายเป็น 1000 เท่า พบผลึกของแคลเซียมซัลเฟต ซึ่งยืนยันได้จากองค์ประกอบทางเคมี ด้วยการวิเคราะห์ EDX ดังแสดงรูปที่ 4.8(ข) ซึ่งไม่ได้ส่งผลต่อความแข็งแรง



(ก)



(ข)

Element	Wt %
O	41.09
Na	2.83
Mg	4.49
Al	13.03
Si	17.69
S	6.30
K	1.12
Ca	9.40
Fe	4.06

รูปที่ 4.8 ผิวหน้าของดินราชบุรีผสมโซเดียมคาร์บอเนตหลังเผา 950 °C

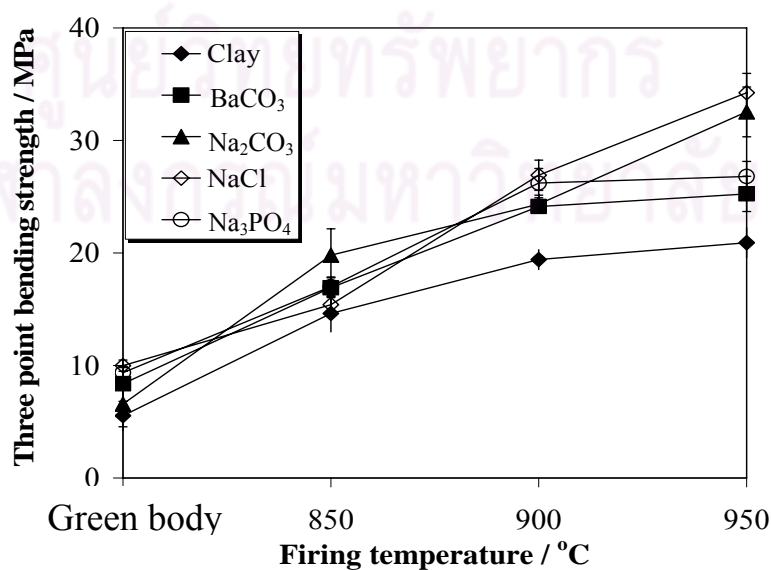
#### 4.5. ความแข็งแรง

ค่าความแข็งแรงจากตารางที่ 4.3 ขึ้นงานก่อนเผาที่เติมด้วย โซเดียมคาร์บอเนต โซเดียม-คลอไรด์และโซเดียมฟอสเฟตมีค่าความแข็งแรงที่สูงกว่าตัวอย่างดินราชบุรี อาจเนื่องมาจากมีการประสานตัวของอนุภาคดินเข้าด้วยกันจากสารละลายเกลือที่แห้งตัวลง และหลังการเผาที่ 950 องศาเซลเซียส ดินราชบุรีและดินราชบุรีที่เติมด้วยแบเรียมคาร์บอเนต จึงทำให้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นแต่มีค่าความแข็งแรงที่ไม่แตกต่างกันมากนัก 22.60 เมกะพาสคัล และ 25.25 เมกะพาสคัล ตามลำดับ

เมื่อเปรียบเทียบดินราชบุรีกับดินราชบุรีเติมด้วยโซเดียมคาร์บอเนตมีความแข็งแรงมากกว่าจาก 22.60 เมกะพาสคัล เป็น 32.53 เมกะพาสคัล ซึ่งเป็นการยืนยันว่ารอยแตกที่เกิดขึ้นนั้นไม่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงสำหรับดินราชบุรี ค่าความแข็งแรงมากขึ้นเนื่องจากโซเดียมออกไซด์ทำหน้าที่เป็นฟลักซ์ที่เกิดจากการสลายตัวของโซเดียมซัลเฟต ซึ่งทำให้ช่วยลดอุณหภูมิการเผา

ตารางที่ 4.3 ค่าความแข็งแรงของชิ้นงาน (MPa)

อุณหภูมิ (°C)	ดินราชบุรี	เติม BaCO <sub>3</sub>	เติม Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	เติม NaCl	เติม Na <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>
Green body	5.53	6.22	6.57	9.98	9.36
850	14.72	16.91	19.81	15.41	17.00
900	19.14	24.13	24.34	26.90	26.20
950	22.60	25.25	32.53	34.24	26.79



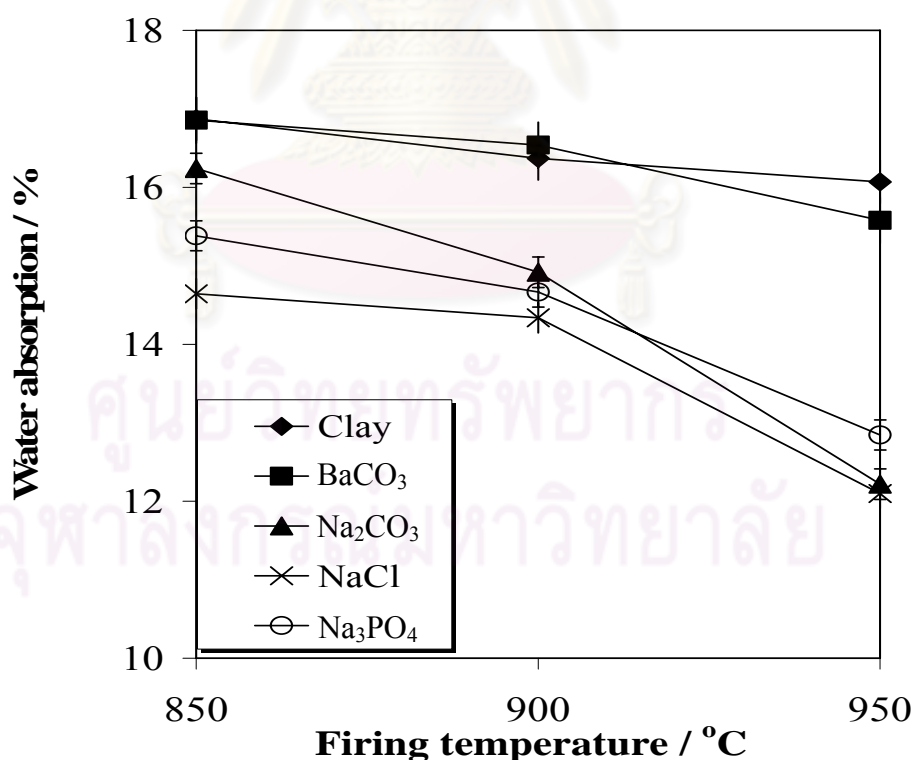
รูปที่ 4.9 ค่าความแข็งแรงของชิ้นงานก่อนเผาและหลังเผา

#### 4.6. การดูดซึมน้ำ

ค่าการดูดซึมน้ำซึ่งสอดคล้องกับค่าความแข็งแรงการเผาที่ 950 องศาเซลเซียสดินราชบุรี และดินราชบุรีเติมแบเรียมคาร์บอเนตมีค่าการดูดซึมน้ำ ร้อยละ 16.07 และร้อยละ 15.58 ตามลำดับเมื่อเทียบกับกาดินราชบุรีเติมโซเดียมคาร์บอเนตมีค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ 12.22 แสดงให้เห็นว่าการเติมโซเดียมคาร์เนตช่วยให้การสุกตัวที่ดีกว่า รวมทั้งการเติมด้วยโซเดียมคลอไรด์ หรือโซเดียมฟอสเฟต ก็มีค่าการดูดซึมน้ำที่ต่ำกว่าด้วย ร้อยละ 12.10 และร้อยละ 12.84 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.4 ค่าการดูดซึมน้ำของชิ้นงาน (ร้อยละ)

อุณหภูมิ (°C)	ดินราชบุรี	เติม BaCO <sub>3</sub>	เติม Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	เติม NaCl	เติม Na <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>
850	16.87	16.86	16.24	14.64	15.38
900	16.37	16.54	14.92	14.34	14.67
950	16.07	15.58	12.22	12.10	12.84



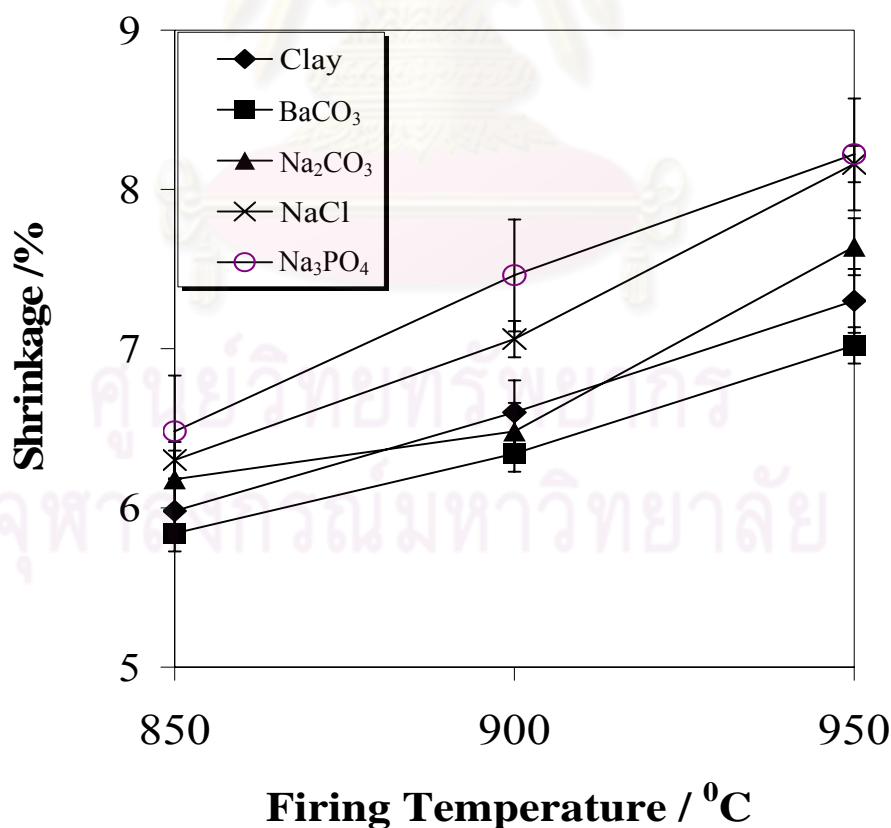
รูปที่ 4.10 ปริมาณการดูดซึมน้ำของตัวอย่างหลังการเผา 850 900 และ 950 °C

#### 4.7. การหดตัว

ค่าการหดของดินราชบุรีและดินราชบุรีเติมแบเรียมคาร์บอเนตเผาที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียสมีค่าการหดตัวร้อยละ 7.30 และร้อยละ 7.02 ตามลำดับ สำหรับการเติมด้วยโซเดียมคาร์บอเนต มีค่าการหดตัวร้อยละ 7.64 ซึ่งมีค่ามากกว่าแสดงให้เห็นว่ามีความสอดคล้องกับค่าของการดูดซึมน้ำและค่าความแข็งแรงที่ยืนยันสมบัติหลังเผาของการเติมโซเดียมคาร์บอเนตที่ดีกว่าการเติมด้วยแบเรียมคาร์บอเนต

ตารางที่ 4.5 ค่าการหดตัวของชิ้นงาน (ร้อยละ)

อุณหภูมิ (°C)	ดินราชบุรี	เติมBaCO <sub>3</sub>	เติมNa <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	เติมNaCl	เติมNa <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>
850	5.98	5.84	6.18	6.30	6.48
900	6.60	6.34	6.48	7.06	7.46
950	7.30	7.02	7.64	8.16	8.22



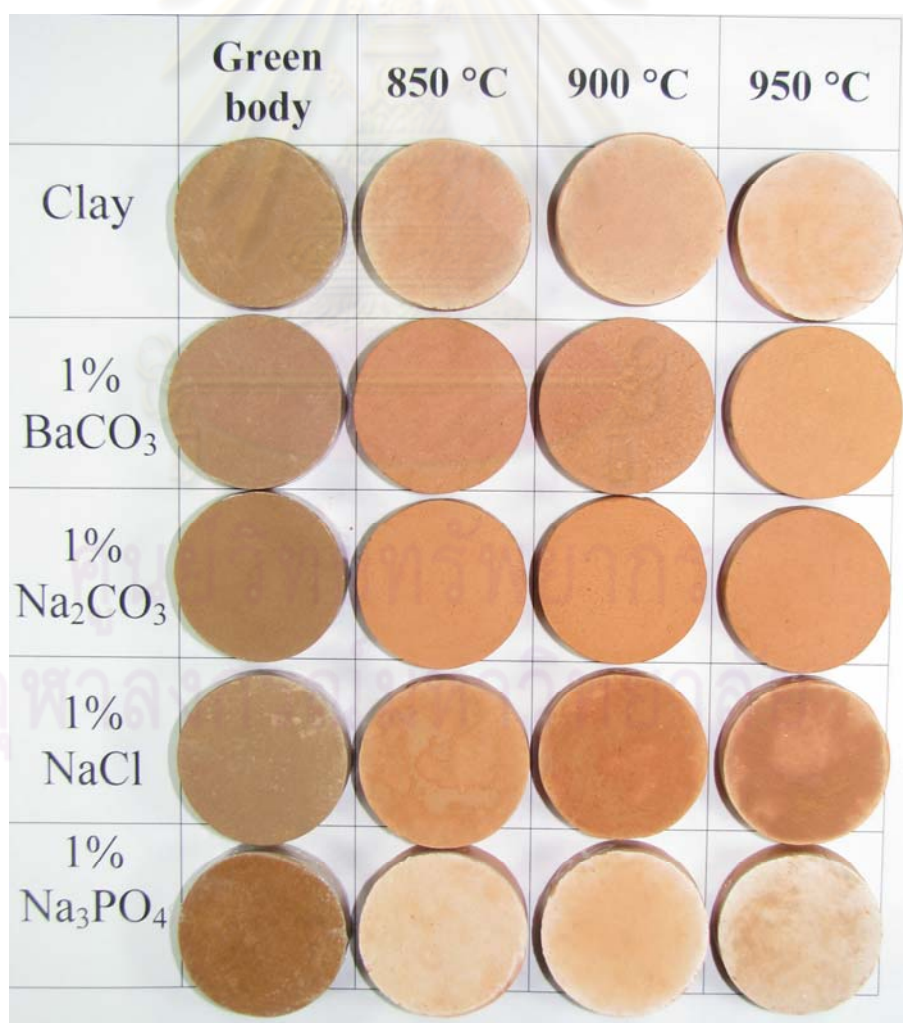
รูปที่ 4.11 ปริมาณการหดตัวของหลังการเผา 850 900 และ 950 °C



#### 4.8. การเปลี่ยนแปลงสี

การเปลี่ยนแปลงค่าสีจากรูปที่ 4.12 จะเห็นได้ว่าผิวหน้าของชิ้นงานจะเห็นได้ว่าการเติมโซเดียมคาร์บอเนตและการเติมแบเรียมคาร์บอเนต ผลที่ได้ไม่ปรากฏคราบขาวหลังการเผาที่ 850 900 และ 950 องศาเซลเซียส จากตารางที่ 4.6 ค่า L ของที่การเผาที่ 950 องศาเซลเซียส มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับระหว่างดินราชบุรี ดินราชบุรีเติมแบเรียมคาร์บอเนตและดินราชบุรีเติมโซเดียมคาร์บอเนตเป็น 69.06, 61.00 และ 54.1 ตามลำดับและไม่ปรากฏคราบสีขาว

การเติมสารแบเรียมคาร์บอเนตให้ค่าสีจะมีค่า L ที่เพิ่มขึ้นจากก่อนเผา 56.25 เป็น 61.00 หลังเผา 950 องศาเซลเซียส แต่ว่าการให้สีแดงและเหลืองเพิ่มขึ้นด้วยจาก 18.11 เป็น 28.19 สำหรับการเติมโซเดียมคาร์บอเนตนั้นจะให้ค่า L ลดลง เมื่อเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้น การให้สีของการเติมโซเดียมคาร์บอเนตนั้นมสีเข้มกว่า เนื้อดินราชบุรีและการเติมแบเรียมคาร์บอเนต



รูปที่ 4.12 รูปการเปลี่ยนแปลงของสีเมื่อเติมสารเติมแต่งและเผาที่ 850 900 และ 950 °C

ตารางที่ 4.6 ผลการเปลี่ยนแปลงสีของตัวอย่าง

ตัวอย่าง	ค่า	สีตามระบบ L*a*b*			
		ดินก่อนเผา	เผาที่ 850°C	เผาที่ 900°C	เผาที่ 950°C
ดินราชบุรี	L	60.31	62.03	64.13	69.06
	a	6.10	15.25	14.87	12.32
	b	13.23	23.58	26.30	19.25
ดินราชบุรี เต็มแบเรียม คาร์บอเนต	L	56.25	58.43	62.11	61.00
	a	7.84	16.63	16.04	16.63
	b	18.11	25.80	28.14	28.19
ดินราชบุรี เต็มโซเดียม คาร์บอเนต	L	52.55	60.51	56.58	54.16
	a	9.77	18.45	20.71	16.21
	b	18.62	29.56	29.52	20.94
ดินราชบุรี เต็มโซเดียม คลอไรด์	L	69.19	61.23	58.11	48.01
	a	3.73	16.30	17.52	19.03
	b	11.09	29.63	30.69	24.68
ดินราชบุรี เต็มโซเดียม ฟอสเฟต	L	67.04	70.13	66.24	66.52
	a	4.50	11.94	14.42	12.12
	b	11.13	24.11	26.45	20.30

หมายเหตุ

L ใช้กำหนดค่าความสว่าง

L = 0 แสดงว่าตัวอย่างมีสีดำสมบูรณ์

L = 100 แสดงว่าตัวอย่างมีสีขาวสมบูรณ์

a ใช้กำหนดสีแดงและสีเขียว

a ค่าเป็นบวกสีจะเป็นไปในทางทิศสีแดง

a ค่าเป็นลบสีจะเป็นไปในทิศทางสีเขียว

b ใช้กำหนดสีเหลืองหรือสีน้ำเงิน

b ค่าเป็นบวกสีจะเป็นไปในทางทิศสีเหลือง

b ค่าเป็นลบสีจะเป็นไปในทางทิศสีน้ำเงิน

#### 4.9. การทดสอบความชื้นด้วยเครื่อง Pfefferkorn plasticity test

ค่าสัมประสิทธิ์ความเหนียวของเนื้อดินบ้นกำหนดความชื้นที่ 22 % แสดงในตารางที่ 4.7 ทำให้เราได้ค่า a ของดินราชบุรีและดินราชบุรีเติมแบเรียมคาร์บอเนตมีค่าไม่แตกต่างกันเท่ากับ 1.47 ซึ่งการละลายน้ำได้ต่ำและทำปฏิกิริยาบริเวณอนุภาคของดินจึงไม่มีผลต่อการไหลตัวของดิน สำหรับการเติมโซเดียมคลอไรด์นั้นเป็น Flocculant ทำให้เนื้อดินค่อนข้างแข็งและการเติมโซเดียมคาร์บอเนตหรือโซเดียมฟอสเฟตนั้นเป็น Deflocculant ส่งผลให้การไหลตัวของดินได้ดีทำให้เนื้อดินบ้นมีความแข็งลดลง

ค่า a หรือค่าสัมประสิทธิ์ความเหนียวของ Pfefferkorn plasticity test ในงานวิจัยนี้มีค่า 1.37-1.66 ซึ่งเมื่อเทียบกับค่ามาตรฐานควรอยู่ที่ 2.5 -4.0<sup>[20]</sup> ดังอธิบายไว้ในหัวข้อ 2.8 ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากส่วนผสมของดินที่ใช้ในการทดลองนี้ไม่ได้เติมส่วนผสมของ ททราย กรีก หรือวัสดุอื่นๆ จึงทำให้ค่าที่ได้แตกต่างออกไปซึ่งอาจจะยังไม่เหมาะสมสำหรับการใช้บ้นขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ แต่ก็มีความชื้นและความเหนียวเพียงพอต่อการขึ้นรูปในการทดลองนี้

ตารางที่ 4.7 ค่าสัมประสิทธิ์ความเหนียวของเนื้อดินบ้นความชื้นร้อยละ 22

ค่า	ดินราชบุรี	เติม BaCO <sub>3</sub>	เติม Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	เติม NaCl	เติม Na <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>
a	1.47	1.47	1.66	1.37	1.58
S.D.	0.02	0.02	0.07	0.02	0.07

ทำการลดค่าความชื้นหมายถึงการลดปริมาณการใช้น้ำลดลงซึ่งมีผลต่อการแห้งของผลิตภัณฑ์ การหดตัวหลังเผาทำให้ผลิตภัณฑ์แตกเสียหายน้อยลง ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์ความเหนียวเท่ากับดินราชบุรี (1.47) ที่มีความชื้นร้อยละ 22 ทำให้ลดค่าความชื้นลงได้ โดยใช้ความชื้นร้อยละ 21 และทำให้สามารถลดการหดตัวก่อนเผาจากร้อยละ 5.88 เป็นร้อยละ 5.32 ดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ค่าสัมประสิทธิ์ความเหนียวของเนื้อดินบ้นเปรียบเทียบความชื้น

ค่า	ดินราชบุรี ความชื้นร้อยละ 22	เติม Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> ความชื้นร้อยละ 21
a	1.47	1.47
S.D.	0.02	0.02

ตารางที่ 4.9 ค่าการหดตัว (ร้อยละ)

อุณหภูมิ (°C)	ดินราชบุรี ความชื้นร้อยละ 22	S.D.	เติม Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> ความชื้นร้อยละ 21	S.D.
Green body	5.88	0.23	5.32	0.31
850	5.98	0.98	5.78	0.08
900	6.60	0.21	6.36	0.11
950	7.30	0.20	7.70	0.20



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1. สรุปผลการวิจัย

ปัจจัยการเกิดคราบขาวในเนื้อดินปั้นราชบุรีเกิดจากการแพร่ของแคลเซียมซัลเฟต ในรูปของแร่ยิมซัม ที่อยู่ในเนื้อดิน

การใช้โซเดียมคาร์บอเนต ร้อยละ 1 สามารถยับยั้งการเกิดคราบขาวในดินราชบุรีได้และทำให้ค่าความแข็งแรงหลังเผามากขึ้น กว่ากรณีไม่เติม จาก 22.60 เมกะ-พาสคัล เพิ่มขึ้นเป็น 32.53 เมกะพาสคัล

การใช้โซเดียมคาร์บอเนตร้อยละ 1 มีค่าความแข็งของเนื้อดินปั้นลดลง (Pfefferkorn plastic test) ทำให้สามารถลดความชื้นที่ใช้ในการเตรียมเนื้อดินปั้นจากร้อยละ 22 เหลือร้อยละ 21 ทำให้การหดตัวก่อนเผาลดลงจากร้อยละ 5.88 เหลือร้อยละ 5.32

การเติมโซเดียมคลอไรด์หรือโซเดียมฟอสเฟส แม้ว่าสมบัติหลังเผาค่อนข้างดีแต่ไม่สามารถยับยั้งการเกิดคราบขาวได้

#### 5.2. ข้อเสนอแนะ

ทำการทดลองเพิ่มผลของระยะเวลาการหมักเนื้อดิน เนื่องจากการเตรียมเนื้อดินในบางโรงงานไม่มีหมักดินหรือบางโรงงานมีการหมักดินเป็นเวลาถึง 3 วัน

ขยายผลที่ได้จากการทดลองโดยจะนำไปใช้แก้ปัญหาคาบขาวในโรงงานซึ่งมีปริมาณการเตรียมเนื้อดินปั้นในปริมาณมาก

การทดลองเพื่อหาปริมาณการเติมโซเดียมคาร์บอเนตที่เหมาะสมสำหรับการยับยั้งการเกิดคราบขาวโดยใช้ปริมาณต่างๆ กัน ระหว่างร้อยละ 0.5 – 2.0 เพื่อให้เหมาะสมกับปริมาณของแคลเซียมซัลเฟตในดินแต่ละแหล่ง

## รายการอ้างอิง

- [1] Broxnell, W.E. Fundamental Factor Influencing Efflorescence. J. Am. Ceram. Soc. 32 (1949):375-386.
- [2] Parmlee, C.W. Soluble Salt and Clay Wares. J. Am. Ceram. Soc. 5 (1922):538 - 553.
- [3] Wilson, H. Progress Report on The Efflorescence and Scumming of Mortar Material. J. Am. Ceram. Soc. 11 (1927):1-31.
- [4] Moody, W.E. Effect of Particle Size and Deflocculation of Barium carbonate on scum control. Am. Ceram. Soc. Bull. 44 (1965):604-607.
- [5] Bennett, A.L., and Goodrich, H.R. The Reactivity Test for Determining the Value of Barium Carbonate as a Scum Preventative. J. Am. Ceram. Soc. 13 (1930):143-240.
- [6] Kindrick, R.H. Extended BaCO<sub>3</sub> for Brick Scum Prevention Patent number 4226635.1980.
- [7] ธานกร วาสนาเพียรพงศ์ สิริพรรณ นิลไพรัช และ ดนัย อารยะพงษ์. ผลของการเติมโซเดียมคาร์บอเนตต่อคุณสมบัติการเผาของเนื้อดินปั้นทำไห. การประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 17, 4-7.วันที่ 29-30 ตุลาคม 2550 โรงแรมดิเอ็มเพรส เชียงใหม่, 2550.
- [8] สมศักดิ์ ขวลาวัฒน์. เซรามิกส์. กรุงเทพมหานคร: โอเดียนสโตร์, 2549.
- [9] ไทยทัวร์ อินโฟ. [online] 2542. Available from: [http://www.thai-tour.com/thai-tour/Central/nonthaburi/data/place\\_index.htm](http://www.thai-tour.com/thai-tour/Central/nonthaburi/data/place_index.htm). [2552,january 30].
- [10] ชลชัย ศรีสุข และ อรวรรณ ไพบูลย์วัฒนผล. ผลกระทบของเกลือซัลเฟตต่อผลิตภัณฑ์เซรามิก. [online] 2544. Available from: [http://www.dss.go.th/dssweb/st-articles/files/ct\\_1\\_2546\\_sulphur\\_ceramic.pdf](http://www.dss.go.th/dssweb/st-articles/files/ct_1_2546_sulphur_ceramic.pdf). [2552,10 พฤศจิกายน].
- [11] ไพจิตร อังศิริวัฒน์. เนื้อดินเซรามิกส์. กรุงเทพมหานคร: โอ เอส พริ้นติ้ง เฮาส์, 2541.
- [12] Shell, H.R., and Cortelyout, W.P. Soluble Sulfate Content of Pottery Bodies During Preparation. J. Am. Ceram. Soc. 26 (1943):179-185.
- [13] Grimshaw, R.W. The chemistry and physics of clays and allied ceramic materials. New York: John Wiley and Sons, 1971.

- [14] Lawrence, W.G., and West, R.R. Ceramic Science for Pottery. 2<sup>nd</sup> edition. Pennsylvania: Chilton book, 1982.
- [15] Brownell, W.E. Structure clay products. New York: Springer-Verlag, 1976.
- [16] Huantanom, P. Development of frost resistance property in terra-cotta pottery. Master's Thesis, Department of Materials Science Faculty of Science Chulalongkorn University, 2004.
- [17] Brownell, W.E. Subsolidus Reactions Between Mullite and Iron Oxide. J. Am. Ceram. Soc. 41 (1958):226-230.
- [18] Brosnan, D.A., and Robinson, G.C. Introduction to drying of ceramic. Ohio: The American Ceramic Society, 2003.
- [19] Norton, F.H. Elements of Ceramics. Massachusetts: Addison-Wesley publishing company, 1957.
- [20] Prapan, A. Effects of sand and pottery stone on physical properties of terra cotta body. Doctor 's Thesis, Department of Materials Science Faculty of Science Chulalongkorn University, 2007.
- [21] Ryan, W., and Radford, C. Whitewares production testing and quality control. New York: Pergamon press, 1987.
- [22] ปรีดา พิมพ์ขาวขำ. เซรามิกส์. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จะพาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.
- [23] Digitalfire cooeration. [online] 1998. Available from: <http://medalta.com/tour/fullscreens/4-2.jpg>. [2009,May 30].
- [24] วิทยาศาสตร์, กรม. เอกสารประกอบการสัมมนา เครื่องปั้นดินเผาจังหวัดราชบุรี เสนอที่สถาบันพัฒนาฝีมือแรงงานภาคตะวันออกเฉียงเหนือ: 2544.(เอกสารไม่ตีพิมพ์).
- [25] สิริพรรณ นิลไพรัช, รายงานฉบับสมบูรณ์โครงการวิจัยดินเพื่อการพัฒนาคุณภาพผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมดินเผา. เสนอสำนักงานอุตสาหกรรมจังหวัดอ่างทอง: 2548.(เอกสารไม่ตีพิมพ์).
- [26] ธนากร วาสนาเพียรพงศ์ และคณะ. การลดอุณหภูมิการเผาเครื่องปั้นดินเผาราชบุรีด้วยการเติมโซเดียมคาร์บอเนต ใน การประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 33, หน้า1-3.18-20 ตุลาคม 2550 ณ มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ จังหวัดนครศรีธรรมราช, 2550.

- [27] American Society for Testing and Material (ASTM). Standard Test Method for Modulus of Rupture of Unfired Clays. [ASTM C689-93](#) New York, ASTM
- [28] American Society for Testing and Material (ASTM). Standard Test Method for Drying and Firing Shrinkages of Ceramic Whiteware Clays. [ASTM C326-03](#) New York, ASTM
- [29] American Society for Testing and Material (ASTM). Standard Test Method for Water Absorption, Bulk Density, Apparent Porosity, and Apparent Specific Gravity of Fired Whiteware Products. [ASTM C373-88](#) New York, ASTM



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

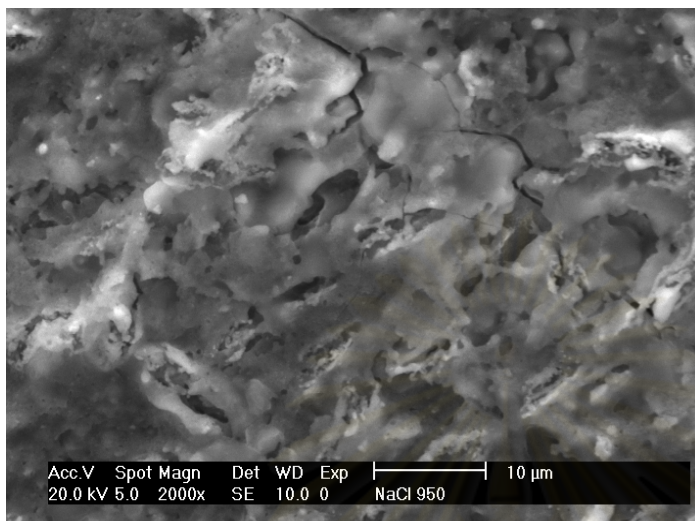




ภาคผนวก

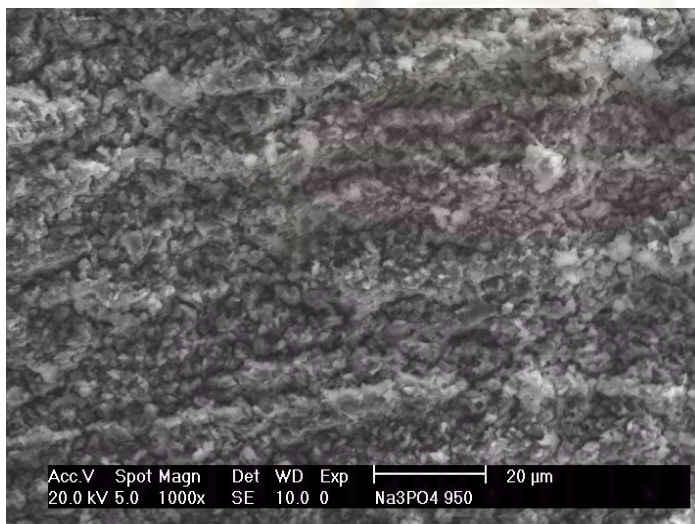
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก



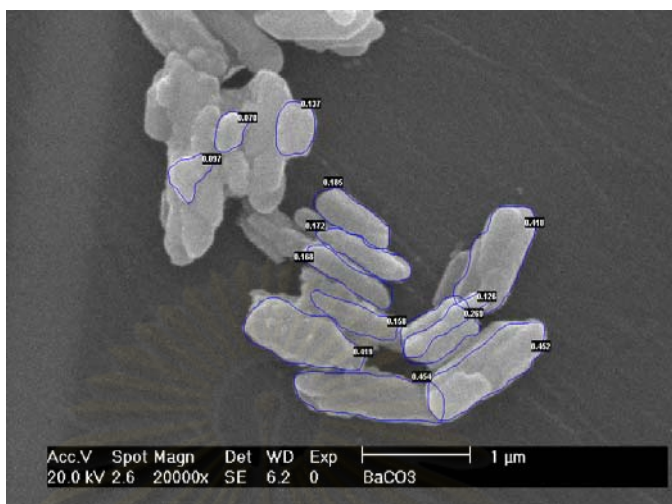
Element	Wt %
Na	3.25
Mg	1.55
Al	17.30
Si	26.84
S	0.65
K	0.59
Ca	7.91
Ti	0.34
Fe	3.61

ภาพขยาย 1000 เท่าผิวหน้าของดินราชบุรีผสมโซเดียมคลอไรด์หลังเผา 950 °C



Element	Wt %
O	53.87
Mg	1.46
Al	4.09
Si	5.84
P	1.39
S	15.01
Ca	17.79
Fe	0.54

ภาพขยาย 1000 เท่าผิวหน้าของดินราชบุรีผสมโซเดียมคลอไรด์หลังเผา 950 °C



ขนาดของแบเรียมคาร์บอเนต

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ข

ตารางการทดสอบความชื้นด้วยเครื่อง Pfefferkorn plasticity test

ดินราชบุรี (ความชื้นร้อยละ 22)

sample	$h_0$	$h_1$	$h_0:h_1$	$G_1$	$G_2$	% Moisture
1	40	27	1.48	65.30	51.05	21.82
2	40	27	1.48	65.74	51.40	21.81
3	40	27	1.48	65.67	51.32	21.85
4	40	28	1.43	66.40	52.07	21.58
5	40	27	1.48	65.86	51.50	21.80
Avg			1.47	65.79		21.77
SD		0.45	0.02			

ดินราชบุรี ผสมแบเรียมคาร์บอเนต 1wt % (ความชื้นร้อยละ 22)

sample	$h_0$	$h_1$	$h_0:h_1$	$G_1$	$G_2$	% Moisture
1	40	27	1.48	65.91	51.54	21.80
2	40	28	1.43	65.76	51.45	21.76
3	40	27	1.48	66.17	51.76	21.78
4	40	27	1.48	65.43	51.06	21.96
5	40	27	1.48	65.66	51.38	21.75
Avg			1.47	65.79		21.81
SD			0.02			

ดินราชบุรีผสมซีเมนต์คาร์บอนเนต 1wt % (ความชื้นร้อยละ 22)

sample	$h_0$	$h_1$	$h_0:h_1$	$G_1$	$G_2$	% Moisture
1	40	24	1.67	65.35	50.96	22.02
2	40	24	1.67	65.74	51.25	22.04
3	40	23	1.74	65.57	51.18	21.95
4	40	26	1.54	65.82	51.47	21.80
5	40	24	1.67	65.77	51.36	21.91
Avg			1.66	65.65		21.94
SD			0.07			

ดินราชบุรีผสมซีเมนต์คลอไรด์ 1wt % (ความชื้นร้อยละ 22)

sample	$h_0$	$h_1$	$h_0:h_1$	$G_1$	$G_2$	% Moisture
1	40	30	1.33	66.52	52.26	21.44
2	40	29	1.38	66.32	52.20	21.29
3	40	29	1.38	66.34	51.93	21.72
4	40	29	1.38	66.20	51.93	21.56
5	40	29	1.38	65.46	51.33	21.59
Avg			1.37	65.89		21.52
SD			0.02			

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ดินราชบุรีผสมซีเมนต์ฟอสเฟต 1wt % (ความชื้นร้อยละ 22)

sample	$h_0$	$h_1$	$h_0:h_1$	$G_1$	$G_2$	% Moisture
1	40	25	1.60	65.80	51.14	22.28
2	40	27	1.48	65.94	51.29	22.22
3	40	24	1.67	64.44	50.08	22.28
4	40	26	1.54	65.29	50.59	22.51
5	40	25	1.60	65.28	50.67	22.38
Avg			1.58	65.44		22.34
SD			0.07			

ดินราชบุรีผสมซีเมนต์คาร์บอนเนต 1wt % (ความชื้นร้อยละ 21)

sample	$h_0$	$h_1$	$h_0:h_1$	$G_1$	$G_2$	% Moisture
1	40	27	1.48	66.51	52.46	22.02
2	40	30	1.33	66.48	52.51	22.04
3	40	28	1.43	66.41	52.42	21.95
4	40	29	1.38	66.68	52.69	21.80
5	40	28	1.43	66.60	52.63	21.91
Avg			1.41			21.94
SD			0.07			

$H_0$  = ความสูงเริ่มต้น

$h_1$  = ความสูงหลังการตกกระทบของแผ่นทองเหลือง

$G_1$  = น้ำหนักเปียก

$G_2$  = น้ำหนักแห้ง

ตารางค่าความแข็งแรงของตัวอย่าง

ดินราชบุรี (ความชื้นร้อยละ 22)

sample	Green body	850 °C	900 °C	950 °C
1	5.95	12.84	19.85	23.14
2	6.14	15.90	17.82	24.18
3	4.52	14.30	17.93	20.98
4	5.24	13.67	20.46	18.24
5	5.82	16.87	19.62	26.45
Avg	5.53	14.72	19.14	22.60
SD	0.66	1.65	1.19	3.13

ดินราชบุรี ผสมแบเรียมคาร์บอเนต 1wt %

sample	Green body	850 °C	900 °C	950 °C
1	8.37	16.95	22.42	24.75
2	5.91	16.36	24.48	26.28
3	4.37	17.40	25.47	24.72
4	4.82	17.83	25.16	24.31
5	7.62	15.98	23.09	26.18
Avg	6.22	16.91	24.13	25.25
SD	1.74	0.75	1.32	0.91

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ดินวาชบุรีผสมโซเดียมคาร์บอเนต 1 wt %

sample	Green body	850 °C	900 °C	950 °C
1	7.61	19.47	26.67	29.90
2	5.56	21.58	23.43	34.37
3	6.55	18.38	22.93	33.32
4	5.71	20.60	25.20	32.01
5	7.43	19.02	23.49	32.05
Avg	6.57	19.81	24.34	32.53
SD	0.95	1.28	1.56	1.69

ดินวาชบุรีผสมโซเดียมคลอไรด์ 1 wt %

sample	Green body	850 °C	900 °C	950 °C
1	10.73	15.16	26.19	36.67
2	9.24	16.83	26.16	31.63
3	9.97	14.23	28.35	34.42
4	10.38	16.41	27.44	35.06
5	9.58	14.40	26.35	33.42
Avg	9.98	15.41	26.90	34.24
SD	0.60	1.17	0.97	1.88

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ดินราชบุรีผสมโซเดียมฟอสเฟต 1 wt %

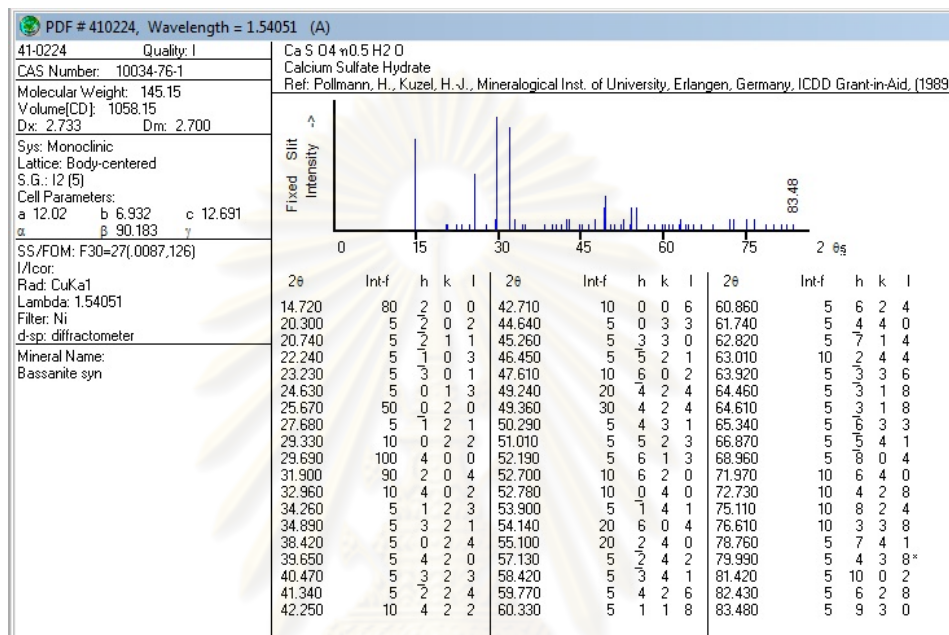
sample	Green body	850 °C	900 °C	950 °C
1	8.88	16.78	24.70	26.53
2	9.71	17.45	27.42	26.03
3	9.48	16.78	26.50	27.82
4	9.64	17.69	25.62	26.19
5	9.07	16.32	26.78	27.40
Avg	9.36	17.00	26.20	26.79
SD	0.36	0.55	1.06	0.78



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

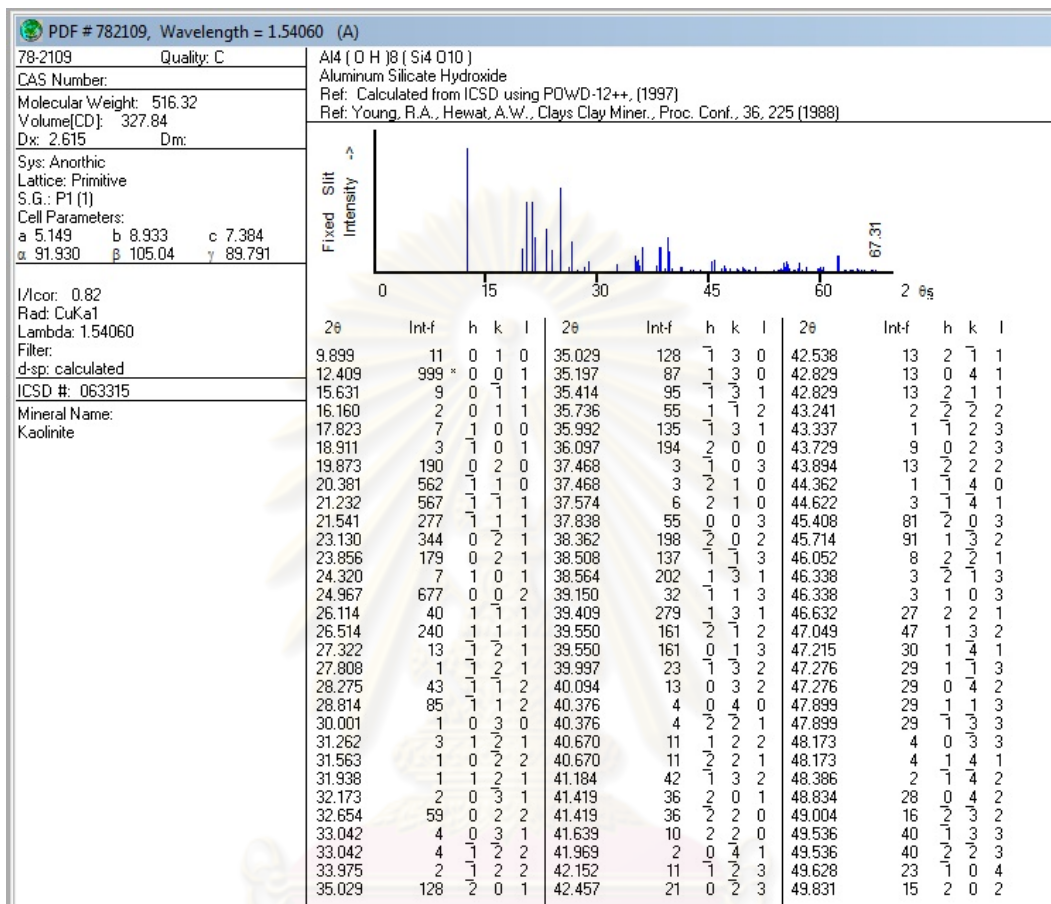
ภาคผนวก ค

ตารางค่า 2θ intensity และ hkl ของ Hemi Hydrate ซึ่งเป็นข้อมูลมาตรฐานจาก 2003 JCPDS-International Centre for Diffraction Data (PCPDFWIN)-หมายเลข JCPDS 41-0224



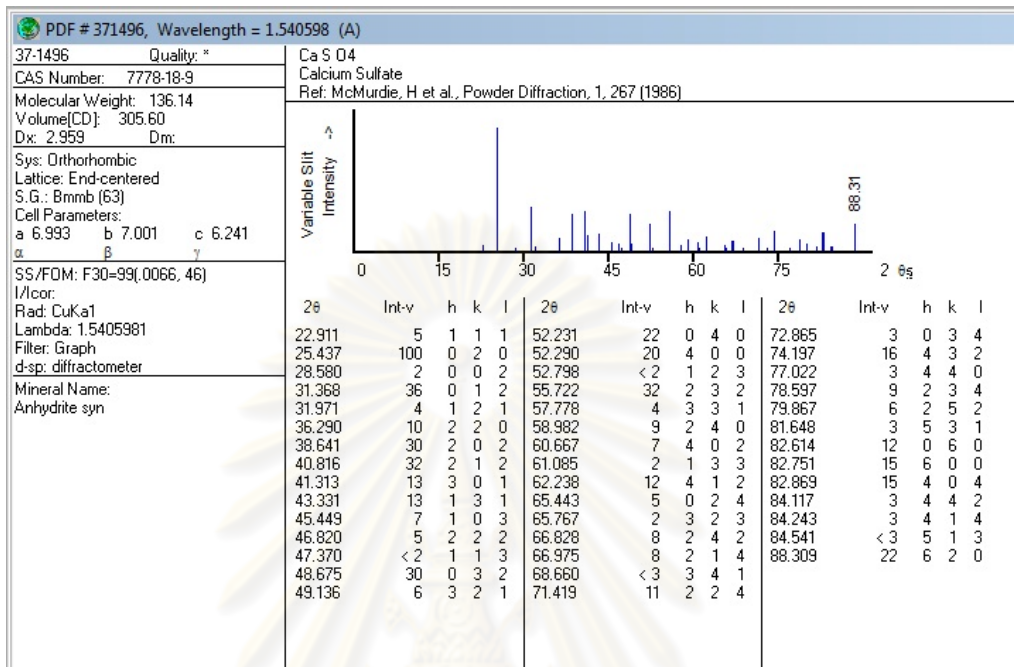
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางค่า 2θ intensity และ hkl ของ Kaolinite ซึ่งเป็นข้อมูลมาตรฐานจาก 2003 JCPDS-International Centre for Diffraction Data (PCPDFWIN) หมายเลข JCPDS 37-1496

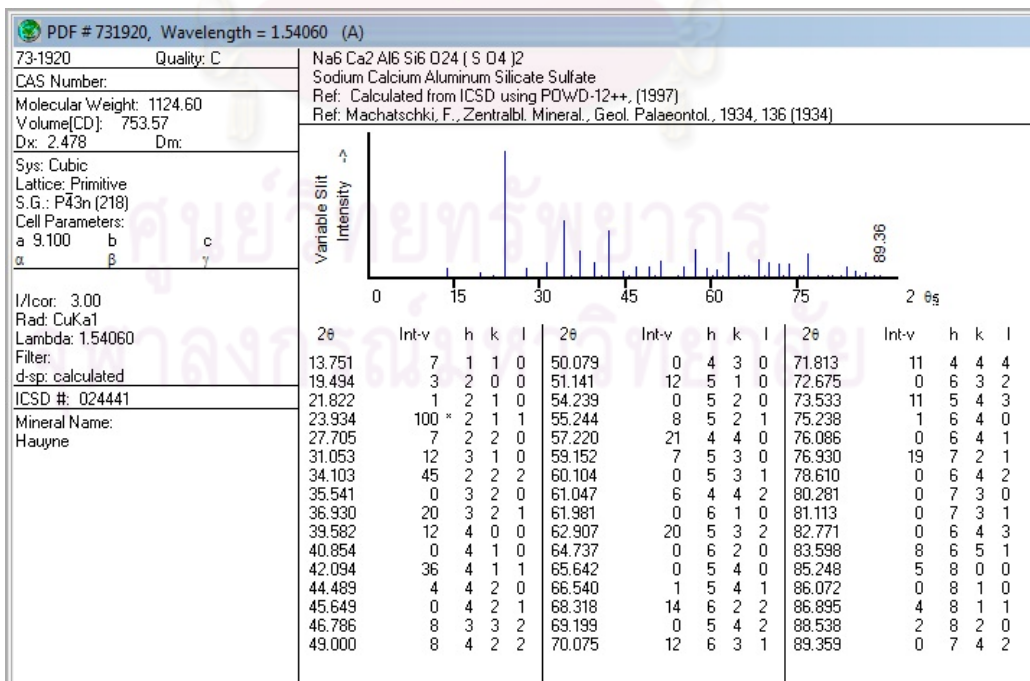


ศูนย์วิทยทรัพยากร  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

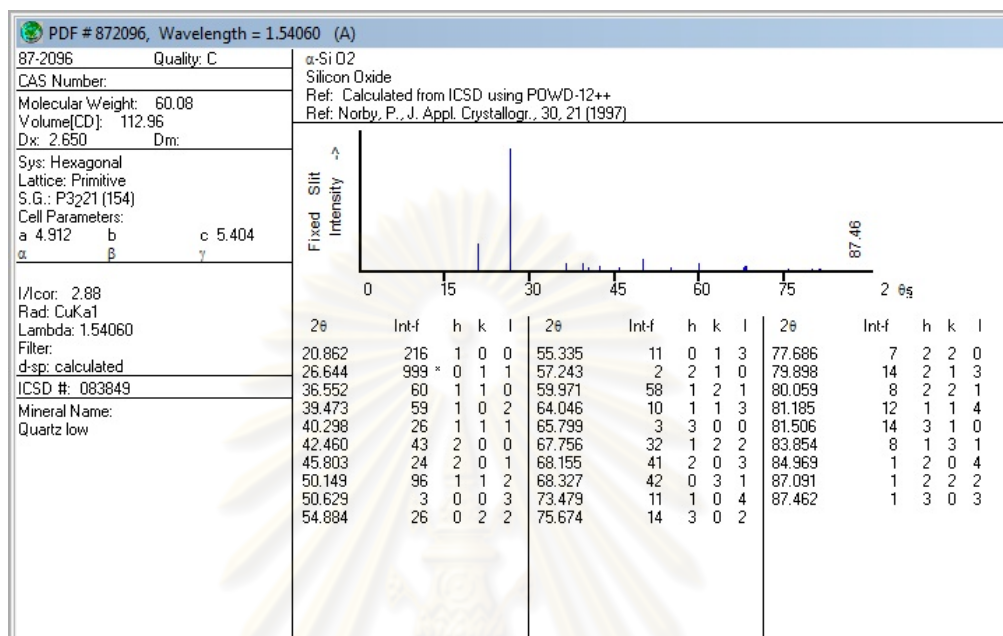
ตารางค่า  $2\theta$  intensity และ hkl ของ Anhydrite ซึ่งเป็นข้อมูลมาตรฐานจาก 2003 JCPDS-International Centre for Diffraction Data (PCPDFWIN) หมายเลข JCPDS 37-1496



ตารางค่า  $2\theta$  intensity และ hkl ของ Hauyne ซึ่งเป็นข้อมูลมาตรฐานจาก 2003 JCPDS-International Centre for Diffraction Data (PCPDFWIN) หมายเลข JCPDS 37-1496

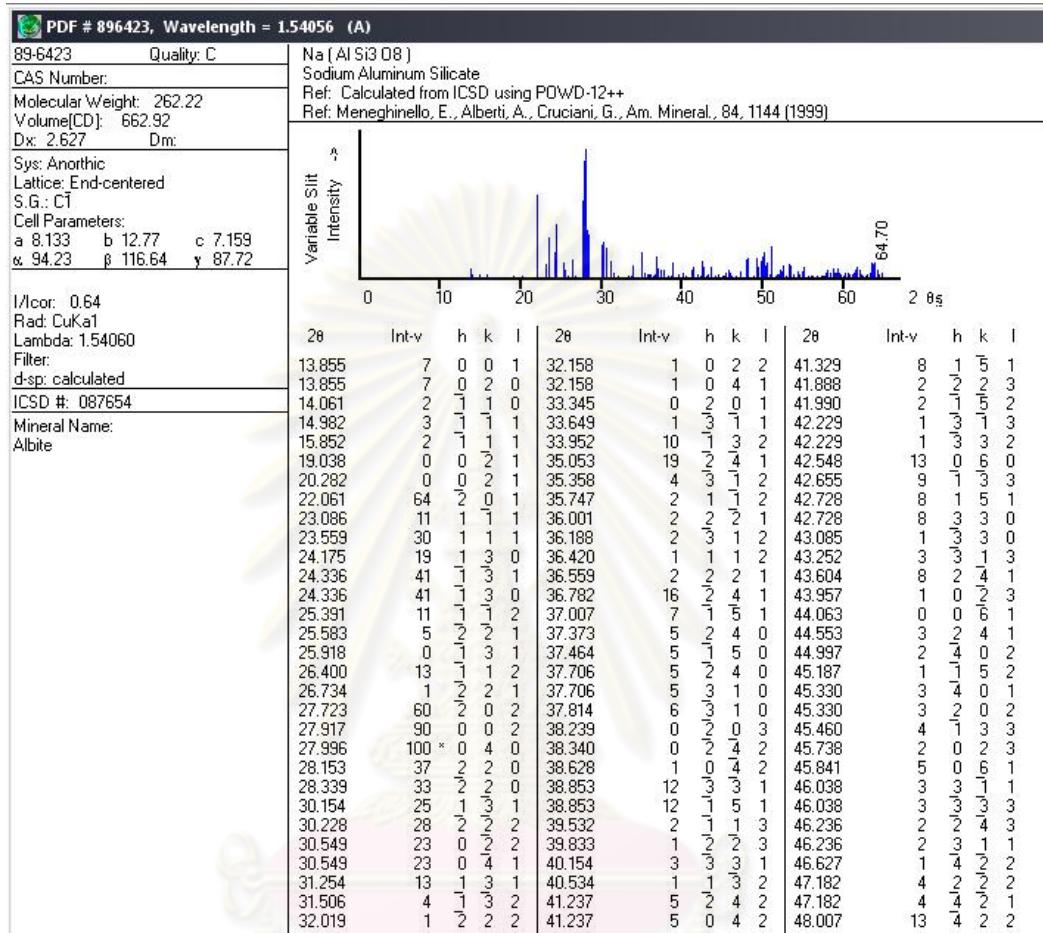


ตารางค่า  $2\theta$  intensity และ hkl ของ Quartz ซึ่งเป็นข้อมูลมาตรฐานจาก 2003 JCPDS-International Centre for Diffraction Data (PCPDFWIN) หมายเลข JCPDS 87-2096



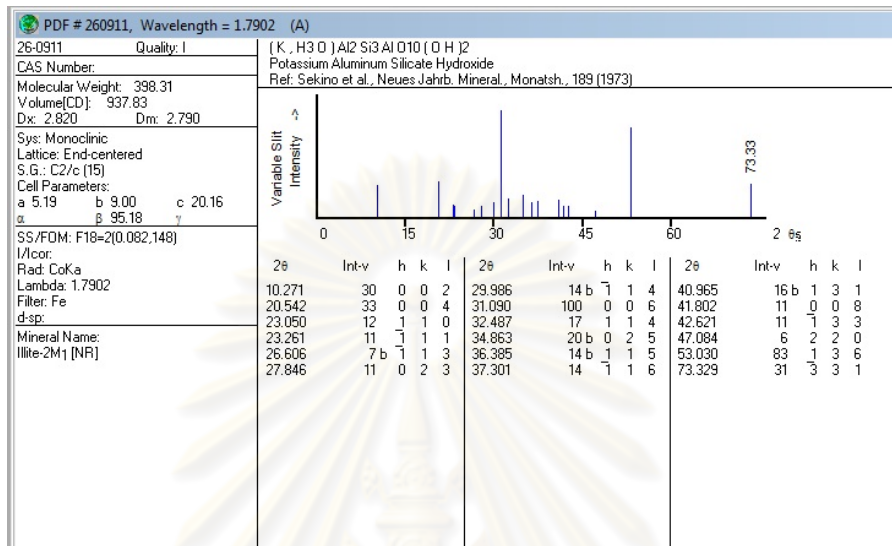
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ค่า 2θ intensity และ hkl ของ Albite ซึ่งเป็นข้อมูลมาตรฐานจาก 2003 JCPDS-International Centre for Diffraction Data (PCPDFWIN) หมายเลข JCPDS 87-2096



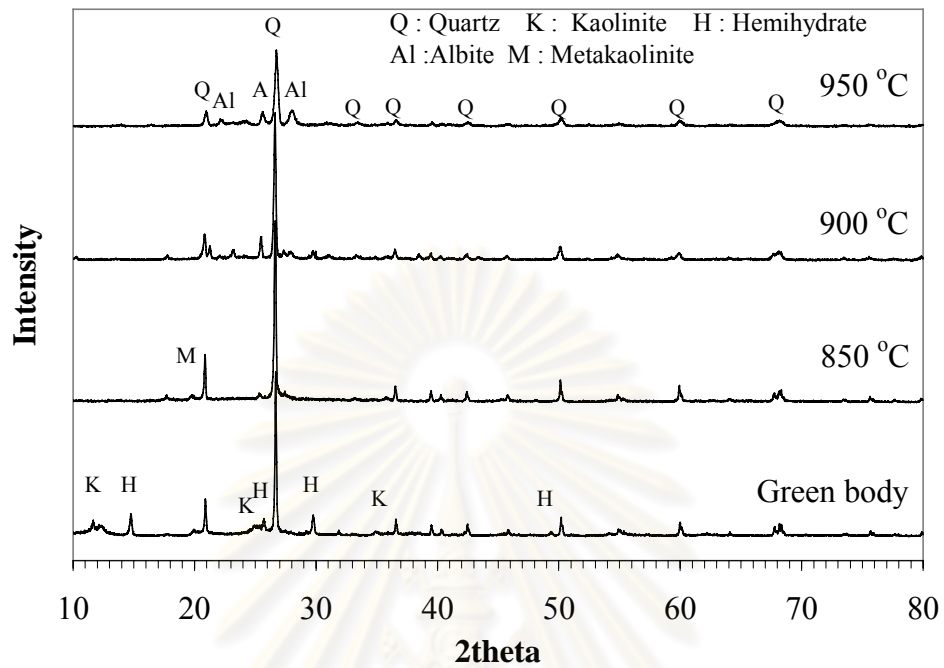
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางค่า  $2\theta$  intensity และ hkl ของ Illite ซึ่งเป็นข้อมูลมาตรฐานจาก 2003 JCPDS-  
International Centre for Diffraction Data (PCPDFWIN) หมายเลข JCPDS 26-0911

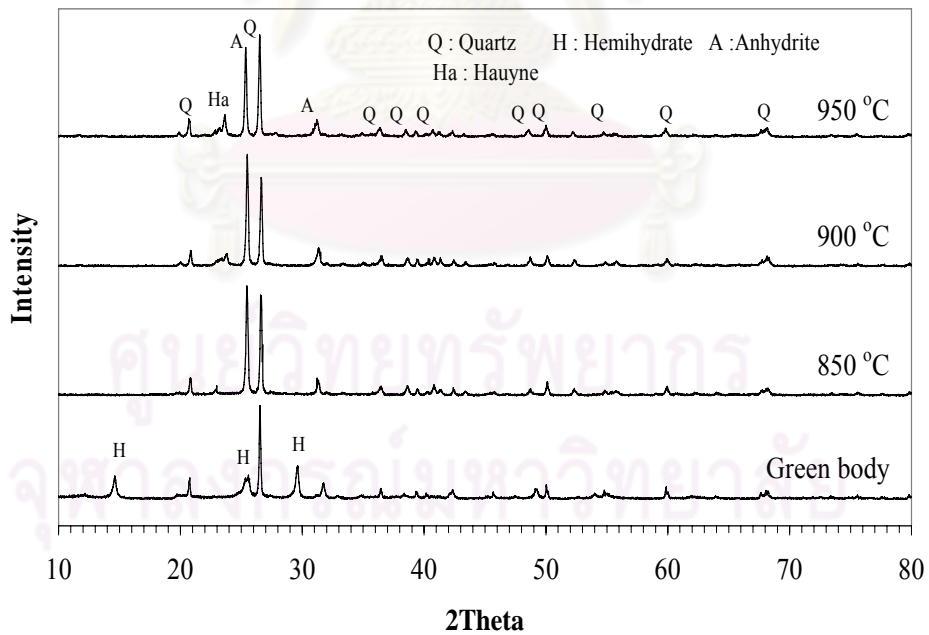


ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ง



การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของค้ประกอบเชิงแร่ของผิวหน้าดินราชบุรีผสมโซเดียมคลอไรด์



การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของค้ประกอบเชิงแร่ของผิวหน้าดินราชบุรีผสมโซเดียมฟอสเฟต



## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายอดิศักดิ์ ถือพลอย เกิดวันที่ 28 พฤศจิกายน พ.ศ. 2518 ตำบลน้ำซำ อำเภอสูงม่น จังหวัดแพร่ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี หลักสูตรครุศาสตรบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน ปี 2546 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีเซรามิก ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปีการศึกษา 2550



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย