



การใช้หินผูลำปางทดแทนหินคอร์นิชในเนื้อดินโบนไชน่า

**THE USE OF LAMPANG POTTERY STONE AS CORNISH STONE
SUBSTITUTE IN BONE CHINA BODY**

กาญจนา ศรีจันทร์

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเซรามิก

มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง

2552

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง

การใช้หินผูลำปางทดแทนหินคอร์นิชในเนื้อดินโบนไชน่า
THE USE OF LAMPANG POTTERY STONE AS CORNISH STONE
SUBSTITUTE IN BONE CHINA BODY

กาญจนา ศรีจันทร์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเซรามิก

มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง

2552

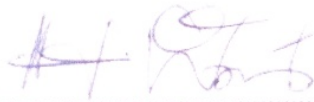
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง

การใช้หินผุล่าปางทดแทนหินคอร์นิชในเนื้อดินโบนไชน่า
THE USE OF LAMPANG POTTERY STONE AS CORNISH STONE
SUBSTITUTE IN BONE CHINA BODY

กาญจนา ศรีจันทร์

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเซรามิก
2552

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



ประธาน

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เกสรินทร์ พิมรักษา)



กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ดรุณี วัฒนศิริเวช)



กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุธี วัฒนศิริเวช)



กรรมการ

(ดร. อุไรวรรณ อินตะถา)

อธิษฐานจิตของมหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลงได้ด้วยการชี้แนะและให้คำปรึกษา ตลอดจนความรู้ทางวิชาการต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ อีกทั้งยังแนะแนวทางการคิดอย่างเป็นเหตุเป็นผล จากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ครุณี วัฒนศิริเวช และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุธี วัฒนศิริเวช ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เกสรินทร์ พิมรักษา และอาจารย์ ดร.อุไรวรรณ อินตะธา ที่กรุณาให้ข้อเสนอแนะ และแก้ไขงานต่างๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านและเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง ที่ให้ความช่วยเหลือในการวิเคราะห์ทดสอบตัวอย่างงานวิจัยนี้สำเร็จได้ด้วยดี

นอกจากนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณ พี่ๆ เพื่อนๆ และน้อง สาขาวิชาวัสดุศาสตร์และสาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเซรามิก ที่คอยช่วยเหลือ สนับสนุนและให้กำลังใจ งานวิจัยนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี

ท้ายที่สุดผู้วิจัยขอขอบพระคุณการสนับสนุนทุกๆด้าน และ ขอบคุณทุกๆกำลังใจที่ยิ่งใหญ่ และ ของ บิดา มารดา และบุคคลภายในครอบครัว ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

กาญจนา ศรีจันทร์

ชื่อเรื่องวิทยานิพนธ์	การใช้หินผุลำปางทดแทนหินคอร์นิชในเนื้อดินบอนไซนา
ชื่อผู้เขียน	กาญจนา ศรีจันทร์
หลักสูตร	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (สาขาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเซรามิก)
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ดรุณี วัฒนศิริเวช ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุธี วัฒนศิริเวช

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาการนำหินผุลำปางมาใช้เป็นตัวหลอมละลายแทนหินคอร์นิชในเนื้อดินบอนไซนาสูตรมาตรฐาน เนื่องจากหินผุลำปางมีแร่ประกอบคือ แร่โอลิไคต์ เฟลด์สปาร์ เควอไรต์ และควอตซ์ คล้ายหินคอร์นิช การทดลองแบ่งเป็น 4 ขั้นตอน ตอนที่ 1 เป็นการวิเคราะห์ปริมาณ Fe_2O_3 ในวัตถุดิบเนื่องจากมีผลต่อความขาวของเนื้อดิน โดยใช้หินผุลำปางของบริษัท ภัทรรัตน์เคลย์แอนด์มินเนรัล จำกัด และ บริษัท ที ไอ ซี จำกัด และดินขาว 3 แหล่งคือ ลำปาง ระนอง และนราธิวาส ผลการทดลองพบว่าหินผุลำปางจากบริษัทภัทรรัตน์เคลย์แอนด์มินเนรัล จำกัด และในดินขาวนราธิวาส มีปริมาณ Fe_2O_3 น้อยที่สุด ในตอนที่ 2 เป็นการศึกษาเพื่อเลือกเนื้อดินที่เหมาะสมจากการเตรียมเนื้อดินเป็น 2 สูตร คือสูตรที่ 1 มีส่วนผสมของ ถ้ำกระดุก หินผุ ดินขาว ในอัตราส่วน 50:25:25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักส่วนสูตรที่ 2 ใช้โพแทสเซียมเฟลด์สปาร์เป็นตัวเติมในสูตรที่ 1 อีก 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพพบว่าหลังการเผาที่อุณหภูมิ 1,250 องศาเซลเซียส เนื้อดินสูตรที่ 2 แสดงสมบัติใกล้เคียงกับเนื้อดินบอนไซนาสูตรมาตรฐานมากกว่าเนื้อดินสูตรที่ 1 เนื้อดินทั้ง 2 สูตรประกอบด้วยผลึก 2 ชนิดคือ ไตรแคลเซียมฟอสเฟต ($Ca_3(PO_4)_2$) และอะโนไรไทต์ ($CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$) ตอนที่ 3 เป็นการศึกษาเพื่อเลือกอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเผาเนื้อดิน โดยนำเนื้อดินสูตรที่ 2 มาศึกษาสมบัติทางกายภาพเช่นเดียวกับตอนที่ 2 นอกจากนั้นนำไปวิเคราะห์ความขาว ความโปร่งแสง เปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์ทางการค้า และศึกษาสมบัติเชิงกลของเนื้อดินหลังการเผาที่อุณหภูมิ 1,220 – 1,250 องศาเซลเซียส พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเผาเนื้อดินคือ 1,250 องศาเซลเซียส แต่ขั้นตอนตอนนี้มีความขาวและความโปร่งแสง

น้อยกว่าผลิตภัณฑ์ทางการค้า และมีสมบัติเชิงกลใกล้เคียงกับเนื้อดินโบนไชน่าที่มีการรายงานมาก่อน ตอนที่ 4 เป็นการทดสอบการหล่อผลิตภัณฑ์ โดยนำเนื้อดินสูตรที่ 2 มาเตรียมเป็นน้ำดินที่มีปริมาณของแข็ง 41, 43 และ 45 เปอร์เซ็นต์ พบว่าน้ำดินที่มีปริมาณของแข็งมากกว่า 43 เปอร์เซ็นต์สามารถขึ้นรูปด้วยการหล่อได้ดี ไม่เกิดการแตกร้าวของผลิตภัณฑ์หลังการหล่อ เนื้อดินโบนไชน่าที่มีหินผุเป็นส่วนผสม หลังการเผาที่อุณหภูมิ 1,250 องศาเซลเซียส มีค่าความหนาแน่น 2.54 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร การดูดซึมน้ำ 0.03 เปอร์เซ็นต์ รุพรูปปรากฏ 0.07 เปอร์เซ็นต์ มีความแข็งแรง 97 เมกะปาสกาล ความต้านทานการแตกร้าว $1.9 \text{ MPa.m}^{1/2}$ และมีค่าความขาว 93

คำสำคัญ: โบนไชน่า / หินผุ / หินคอร์นิช



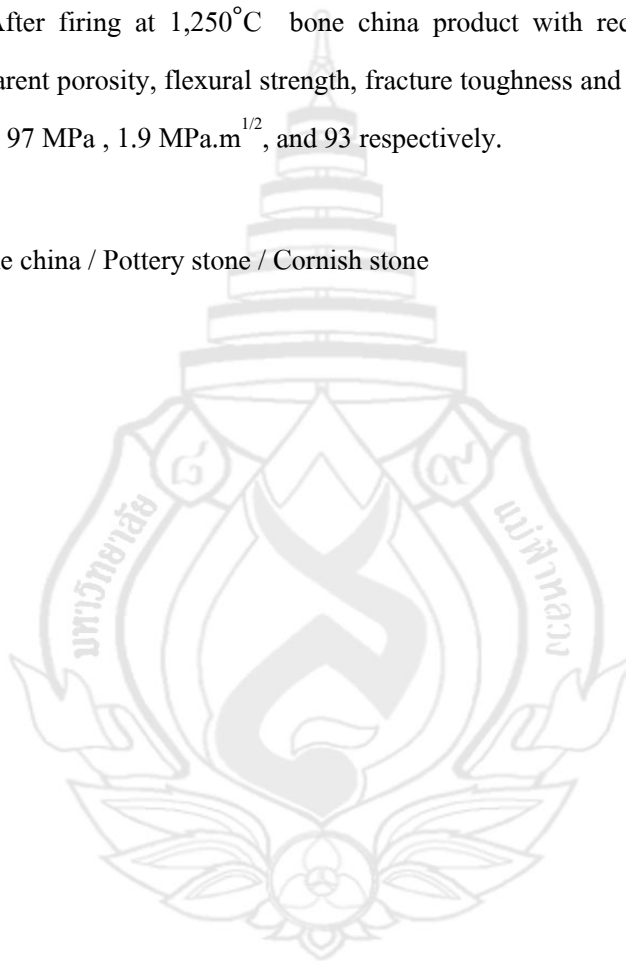
Thesis Title	The Use of Lampang Pottery Stone as Cornish Stone Substitute in Bone China Body.
Author	Karnjana Srijun
Degree	Master of Science (Ceramic Industrial Technology)
Supervisory Committee	Assist. Prof. Dr. Darunee Wattanasiriwech Assist. Prof. Dr. Suthee Wattanasiriwech

ABTRACT

This project aimed to study fluxing ability of Lampang pottery stone which was used in place of cornish stone in the standard bone china body, mainly because Lampang pottery stone contained minerals including illite, feldspar, kaolinite and quartz similar to the cornish stone. The experimental procedures were divided into 4 stages. Firstly, 2 sources of Lampang pottery stone (Patrrarat Clay and Mineral Co.Ltd and T.I.C Co.Ltd) and china clay from 3 provinces (Lampang, Ranong and Narathiwas) were analysed to select the lowest Fe_2O_3 quantity because it can affect the whiteness of bone china. The result showed that pottery stone from Patrrarat Clay and Mineral Co.Ltd and china clay from Narathiwas were the lowest Fe_2O_3 contents. The second stage was to select suitable body recipe from 2 recipes. The compositions of recipe 1 was bone ash, pottery stone and kaolin in the weight ratio of 50:25:25 while recipe 2 contained 10 wt % potassium feldspar as addition to recipe 1. After firing at $1,250^\circ\text{C}$, physical properties of recipe 2 was closer to the standard bone china than those of recipe 1. Both recipes contained 2 phase structures of tricalciumphosphate ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) and anorthite ($\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.2\text{SiO}_2$). In the third stage body with recipe 2 was carefully studied to select the optimum firing temperature in the range of $1,220 - 1,250^\circ\text{C}$. Physical properties similar to those in second stage were examined. Moreover, whiteness and translucency were compared to those of commercial products. In addition

mechanical properties of sintered samples at various temperatures were also investigated. It was found that the optimum firing temperature obtained was at 1,250°C . However, the samples still had inferior whiteness and translucency to those of the commercial products while their mechanical properties were similar to the reported literature. Finally, the recipe 2 was prepared to be the slip . The solid contents were varied from 41 ,43 and 45 wt%. It was found that the slip with the solid content >43 wt% could be used to form suitable green body and had no cracks after casting. After firing at 1,250°C bone china product with recipe 2 had density, water absorption, apparent porosity, flexural strength, fracture toughness and whiteness were 2.54 g/cm³ 0.03% , 0.07% , 97 MPa , 1.9 MPa.m^{1/2} , and 93 respectively.

Keyword: Bone china / Pottery stone / Cornish stone



สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	(3)
บทคัดย่อภาษาไทย	(4)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	(6)
สารบัญตาราง	(11)
สารบัญภาพ	(13)
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา	3
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการศึกษา	3
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 เนื้อดินโบนไชน่า	4
2.2 วัตถุประสงค์สำหรับเนื้อดินโบนไชน่า	5
2.3 หินผุ	12
2.4 ขั้นตอนการผลิตโบนไชน่า	13
2.5 ปฏิบัติการในการเผาเนื้อดินโบนไชน่า	17
2.6 คุณสมบัติของเนื้อดินโบนไชน่า	19

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3 วิธีดำเนินการวิจัย	26
3.1 วิธีดำเนินงานวิจัยตอนที่ 1	26
3.2 วิธีดำเนินงานวิจัยตอนที่ 2	30
3.3 วิธีดำเนินงานวิจัยตอนที่ 3	36
3.4 วิธีดำเนินงานวิจัยตอนที่ 4	41
4 ผลการทดลอง	43
4.1 ผลการทดลองขั้นตอนที่ 1	43
4.2 ผลการทดลองขั้นตอนที่ 2	61
4.3 ผลการทดลองขั้นตอนที่ 3	81
4.4 ผลการทดลองขั้นตอนที่ 4	101
5 ผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	104
5.1 สรุปผลการทดลองขั้นตอนที่ 1	104
5.2 สรุปผลการทดลองขั้นตอนที่ 2	104
5.3 สรุปผลการทดลองขั้นตอนที่ 3	105
5.4 สรุปผลการทดลองขั้นตอนที่ 4	105
5.5 ข้อเสนอแนะ	105

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
เอกสารอ้างอิง	106
ภาคผนวก	111
ภาคผนวก ก การขยายตัวทางความร้อนของหินผุลำปาง และการเปลี่ยนแปลงทางความร้อน ของเนื้อดินโปนไชน่า	112
ภาคผนวก ข หลักการทำงานของเครื่อง UV – VIS spectrophotometer	115
ภาคผนวก ค การคำนวณการเติมโพแทสเซียม เฟลด์สปาร์	120
ภาคผนวก ง ผลการวิเคราะห์เข้ากระดูก	121
ประวัติผู้เขียน	127

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 ผลวิเคราะห์หึ่งค์ประกอบทางเคมีของหินคอร์นิช	10
2.2 ผลวิเคราะห์หึ่งค์ประกอบทางแร่ของหินคอร์นิช	10
2.3 สมบัติทางกายภาพของเนื้อดินโบนไซนา ที่ใช้สูตรมาตรฐาน	25
3.1 อัตราส่วนผสมโดยน้ำหนักของวัสดุดิบ	30
4.1 ผลการวิเคราะห์หึ่งค์ประกอบทางเคมีของหินผุ	44
4.2 ผลการวิเคราะห์หึ่งค์ประกอบทางเคมีของดินขาว	46
4.3 วิธีการคำนวณหาปริมาณแร่ในหินผุ บริษัทภัทรารัตน์เคลย์แอนด์มินเนรัล จำกัด	48
4.4 ผลของปริมาณแร่ในหินผุจากบริษัทภัทรารัตน์เคลย์แอนด์มินเนรัล จำกัด	49
4.5 วิธีการคำนวณปริมาณแร่ในดินขาวนาธิวาส	51
4.6 ผลของปริมาณแร่ในดินขาวนาธิวาส	52
4.7 ตารางแสดงปริมาณกากค้างตะแกรงของหินผุ	57
4.8 ผลขนาดอนุภาคของหินผุหลังการบดและร่อนผ่านตะแกรง 325 เมช	59
4.9 ปริมาณกากค้างตะแกรงของดินขาวนาธิวาส	60
4.10 ผลขนาดอนุภาคของดินขาวนาธิวาสร่อนผ่านตะแกรง 325 เมช	61
4.11 ค่าการหดตัวของเนื้อดิน 2 สูตรหลังเผาที่อุณหภูมิ 800 – 1,250 องศาเซลเซียส	62
4.12 ค่าการดูดซึมน้ำของเนื้อดิน 2 สูตรหลังเผาที่อุณหภูมิ 800 – 1,250 องศาเซลเซียส	64
4.13 ค่าความพรุนตัวปรากฏของเนื้อดิน 2 สูตรหลังเผาที่อุณหภูมิ 800 – 1,250 องศาเซลเซียส	65
4.14 ค่าความหนาแน่นของเนื้อดิน 2 สูตรหลังเผาที่อุณหภูมิ 800 – 1,250 องศาเซลเซียส	67
4.15 ค่าการหดตัวของเนื้อดินหลังเผาที่อุณหภูมิ 1,220 – 1,250 องศาเซลเซียส	83
4.16 ค่าการหดตัวของเนื้อดินหลังเผาที่อุณหภูมิ 1,220 – 1,250 องศาเซลเซียส	84

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า
4.17 ค่าความพรุนตัวปรากฏของเนื้อดินหลังเผาที่อุณหภูมิ 1,220 – 1,250 องศาเซลเซียส	85
4.18 ค่าความหนาแน่นของเนื้อดินหลังเผาที่อุณหภูมิ 1,220 – 1,250 องศาเซลเซียส	86
4.19 ค่าความแข็งแรงของเนื้อดินหลังเผาที่อุณหภูมิ 1,220 – 1,250 องศาเซลเซียส	87
4.20 ค่าการต้านทานการแตกร้าวของเนื้อดินหลังเผาที่อุณหภูมิ 1,220 – 1,250 องศาเซลเซียส	89
4.21 ค่าสีของเนื้อดินหลังเผาอบผนิกที่อุณหภูมิ 1,220-1,250 องศาเซลเซียส เปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์ทางการค้า (ผลิตในประเทศ)	90
4.22 พฤติกรรมของน้ำดินและลักษณะผลิตภัณฑ์ที่มีปริมาณของแข็งต่างกัน	101

สารบัญภาพ

ภาพ	หน้า
2.1 โครงสร้างสามมิติของเคโอลิไนต์	7
2.2 การวางผลิตภัณฑ์โบนไชน่าสำหรับเผาดิบ	14
2.3 การเปลี่ยนแปลงของอนุภาคในระหว่างการเผาซินเตอร์	15
2.4 แผนผังแสดงขั้นตอนการผลิตโบนไชน่า	16
2.5 ลักษณะการสะท้อนกลับและการส่องผ่านของวัสดุโปร่งแสง	20
2.6 ภาพการสะท้อนกลับของแสงเมื่อวัดมุมพื้นที่ผิวไม่เรียบ	21
3.1 แผนผังการวิจัยขั้นตอนที่ 1	29
3.2 แบบพิมพ์เหล็กกล้า	31
3.3 แผนผังการวิจัยในขั้นตอนที่ 2	35
3.4 ตัวอย่างชิ้นทดสอบค่าความแข็งแรง	37
3.5 แบบจำลองรอยร้าวที่เกิดจากการทดสอบด้วยหัวกดแบบ Vicker	37
3.6 วิธีการวัดสีระบบ CIE L*a*b*	39
3.7 การตกกระทบและการส่องผ่านของแสง	40
3.8 แผนผังการวิจัยขั้นตอนที่ 3	40
3.9 ขั้นตอนและกลไกในการหล่อแบบ	42
4.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ในหินผุ	49
4.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของดินขาว	52
4.3 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของหินผุ	53
4.4 ความเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของดินขาว	55
4.5 เป็นการแสดงการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของหินผุที่ผ่านการบดด้วยเครื่องบด ความเร็วสูงเป็นเวลา 5 ,10 และ 15 นาที และร้อนผ่านตะแกรงขนาด 325 เมช	58
4.6 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของดินขาวร้อนผ่านตะแกรงขนาด 325 เมช	60

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพ	หน้า
4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการหดตัวของเนื้อดิน 2 สูตร กับการเผาที่อุณหภูมิ 800-1,250 องศาเซลเซียส	63
4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซึมน้ำของเนื้อดิน 2 สูตร กับการเผาที่อุณหภูมิ 800-1,250 องศาเซลเซียส	64
4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความพรุนตัวปรากฏของเนื้อดิน 2 สูตร กับการเผาที่อุณหภูมิ 800-1250 องศาเซลเซียส	66
4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความความหนาแน่นของเนื้อดิน 2 สูตร กับการเผาที่อุณหภูมิ 800-1250 องศาเซลเซียส	67
4.11 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกหลังเผาที่อุณหภูมิต่างๆ ของชั้นทดสอบ เนื้อดินโบนไชน่าสูตรที่ 1	69
4.12 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกหลังเผาที่อุณหภูมิต่างๆ ของชั้นทดสอบ เนื้อดินโบนไชน่าสูตรที่ 2	70
4.13 ลักษณะพื้นผิวการแตกหักหลังเผาที่อุณหภูมิ 800-1,000 องศาเซลเซียส ของตัวอย่างเนื้อดินโบนไชน่าสูตรที่ 1	72
4.14 ตัวอย่างเนื้อดินสูตรที่ 1 หลังเผาที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส แสดงการ เปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงาน	73
4.15 ตัวอย่างเนื้อดินสูตรที่ 1 หลังเผาที่อุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียส แสดงการ เปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงาน	74
4.16 ตัวอย่างเนื้อดินสูตรที่ 1 หลังเผาที่อุณหภูมิ 1,250 องศาเซลเซียส แสดงการ เปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงาน	75
4.17 ลักษณะของพื้นผิวการแตกหักของตัวอย่างเนื้อดินโบนไชน่าสูตรที่ 2 หลังเผาที่อุณหภูมิ 800 - 1,000 องศาเซลเซียส	76

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพ	หน้า
4.18 ตัวอย่างเนื้อดินสูตรที่ 2 หลังเผาที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียสแสดงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงาน	77
4.19 ตัวอย่างเนื้อดินสูตรที่ 2 หลังเผาที่อุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียสแสดงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงาน	78
4.20 ตัวอย่างเนื้อดินสูตรที่ 2 หลังเผาที่อุณหภูมิ 1,250 องศาเซลเซียสแสดงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงาน	79
4.21 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี (EDS) ของผลึกไตรแคลเซียมฟอสเฟต และผลึกอะนอร์ไทต์ ของชิ้นงานสูตรที่ 2 หลังเผาที่อุณหภูมิ 1,250 องศาเซลเซียส	80
4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการหดตัวของเนื้อดินสูตรที่ 2 กับการเผาที่อุณหภูมิ 1,220 – 1,250 องศาเซลเซียส	83
4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซึมน้ำของเนื้อดินสูตรที่ 2 กับการเผาที่อุณหภูมิ 1,220 – 1,250 องศาเซลเซียส	84
4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความพรุนตัวของเนื้อดินสูตรที่ 2 กับการเผาที่อุณหภูมิ 1,220 – 1,250 องศาเซลเซียส	85
4.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นของเนื้อดินสูตรที่ 2 กับการเผาที่อุณหภูมิ 1,220 – 1,250 องศาเซลเซียส	86
4.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงของเนื้อดินสูตรที่ 2 กับการเผาที่อุณหภูมิ 1,220 – 1,250 องศาเซลเซียส	88
4.27 เนื้อดินหลังเผาที่อุณหภูมิ 1,220 และ 1,230 องศาเซลเซียส ที่ผ่านการกดจากหัวกด (Vicker Microhardness)	89
4.28 ค่าความโปร่งแสงด้วยเครื่อง UV – VIS Spectrophotometer ของเนื้อดินหลังเผาอบผงที่อุณหภูมิ 1,220 - 1,250 องศาเซลเซียส เปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์ทางการค้า	92

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพ	หน้า
4.29 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของชั้นทดสอบเนื้อดิน โบนไชน่าสูตรที่ 2	93
4.30 ตัวอย่างเนื้อดินสูตรที่ 1 หลังเผาอบผนึกที่อุณหภูมิ 1,220 องศาเซลเซียส แสดงภาพโครงสร้างทางจุลภาคโดยรวม	95
4.31 ตัวอย่างเนื้อดินสูตรที่ 1 หลังเผาอบผนึกที่อุณหภูมิ 1,230 องศาเซลเซียส แสดงภาพโครงสร้างทางจุลภาคโดยรวม	96
4.32 ตัวอย่างเนื้อดินสูตรที่ 1 หลังเผาอบผนึกที่อุณหภูมิ 1,240 องศาเซลเซียส แสดงภาพโครงสร้างทางจุลภาคโดยรวม	97
4.33 ตัวอย่างเนื้อดินสูตรที่ 1 หลังเผาอบผนึกที่อุณหภูมิ 1,250 องศาเซลเซียส แสดงภาพโครงสร้างทางจุลภาคโดยรวม	98
4.34 ภาพโครงสร้างทางจุลภาคของเนื้อดิน โบนไชน่าของผลิตภัณฑ์ทางการค้า	99
4.35 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี (EDS) ของผลึกไตรแคลเซียมฟอสเฟต และผลึกอะนอร์ไทต์ ของชิ้นงานของผลิตภัณฑ์ทางการค้า	100
4.36 รอยแตกบริเวณก้นผลิตภัณฑ์ก่อนเผาหลังการหล่อ	102
4.37 ผลิตภัณฑ์ก่อนเผาหลังการปล่อยให้ความชื้นค่อยๆออก	102
4.38 ความโปร่งแสงของผลิตภัณฑ์โบนไชน่า หลังการเผาที่ อุณหภูมิ 1,250 องศาเซลเซียส (ปริมาณของแข็ง 43 เปอร์เซนต์)	103



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ไบนไชน่า ตามมาตรฐานการทดสอบของอเมริกัน (ASTM – C242) หมายถึง ผลิตภัณฑ์เครื่องเคลือบดินเผาสีขาว โปร่งแสง ซึ่งมีส่วนผสมของเถ้ากระดูกอย่างน้อย 25 %โดยน้ำหนัก ไบนไชน่าเป็นผลิตภัณฑ์ที่กำเนิดในประเทศอังกฤษ โดยมี โจเซย์ สโปด เป็นบุคคลที่พัฒนาผลิตภัณฑ์และนำไปสู่การค้าขายเป็นครั้งแรก หากจัดประเภทเซรามิกตามลักษณะเนื้อดินแล้ว ไบนไชน่าจัดอยู่ในผลิตภัณฑ์จำพวกพอร์ซเลน เพราะมีเนื้อขาว และแข็งแกร่ง ข้อเด่นของผลิตภัณฑ์ไบนไชน่าคือมีความโปร่งแสง อันเนื่องมาจากมีส่วนผสมของเถ้ากระดูก และยังเป็นผลิตภัณฑ์เซรามิกเนื้อสีขาวชนิดหนึ่งซึ่งมีมูลค่าสูงกว่าผลิตภัณฑ์เซรามิกสีขาวประเภทอื่น นอกจากนี้ผลิตภัณฑ์ไบนไชน่ายังเป็นการออกแบบให้มีรูปทรงสวยงามและมีลวดลายต่างๆ ซึ่งโดยทั่วไปจะเป็นการตกแต่งด้วยลวดลายสีทอง และแพลตตินัม ซึ่งดูเป็นผลิตภัณฑ์ที่เรียบหรู ผลิตภัณฑ์ไบนไชน่าส่วนมากจะเป็นชุดเครื่องใช้บนโต๊ะอาหาร ของประดับตกแต่ง ดังนั้นจึงได้รับความนิยมเป็นผลิตภัณฑ์ในภัตตาคารและโรงแรมระดับสูง นอกจากนั้นยังเป็นกลุ่มที่ต้องการที่จะแสดงออกถึงเอกลักษณ์ของตน ถึงแม้ผลิตภัณฑ์ไบนไชน่าจะมีมูลค่าสูงแต่ก็เป็นผลิตภัณฑ์ที่สะท้อนรสนิยมของผู้ใช้อย่างชัดเจน

ปัจจุบันมีหลายประเทศที่มีการผลิตผลิตภัณฑ์ไบนไชน่าได้แก่ ประเทศอังกฤษ สหรัฐอเมริกา สวีเดน รัสเซีย จีน และญี่ปุ่น โดยเฉพาะประเทศอังกฤษและญี่ปุ่นมีการผลิตเนื้อดินไบนไชน่าสำเร็จรูปเพื่อส่งออกไปยังประเทศต่างๆ อีกด้วย เนื้อดินไบนไชน่ามีสูตรต้นตำรับจากประเทศอังกฤษ มีส่วนผสมในเนื้อดินไบนไชน่า คือ เถ้ากระดูก ดินขาว และ หินคอร์นิช โดยหินคอร์นิชเป็นวัตถุดิบจากเมืองคอร์นวอลล์ ประเทศอังกฤษ มีส่วนประกอบหลักเป็นแร่ควอตซ์ เฟลด์สปาร์ ดินขาว ไมก้า และฟลูออสปาร์ ในระบบอุตสาหกรรมของประเทศไทยต้องมีการนำเข้าเนื้อดินไบนไชน่าจากประเทศอังกฤษและญี่ปุ่น เพื่อผลิตเป็นผลิตภัณฑ์จำพวก ถ้วย ชาม และของที่ระลึกต่าง ๆ จึงทำให้ผลิตภัณฑ์ไบนไชน่ามีราคาแพงกว่าที่ควรจะเป็น ดังนั้นเพื่อเป็นการ

ลดต้นทุนการผลิต ผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะใช้วัตถุดิบภายในประเทศในการทำเนื่อดินโบนไชน่า เพื่อทดแทนการนำเข้าวัตถุดิบและเป็นการนำทรัพยากรที่มีอยู่ภายในประเทศมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด

จากการทบทวนเอกสาร ในประเทศไทยมีผู้คิดค้นสูตรเนื่อดินโบนไชน่าอยู่หลายสูตร เช่น สูตรที่คิดค้นโดย จรัสศรี สมบัติทวี (2524) ซึ่งมีส่วนผสม คือ เถ้ากระดูก ดินขาวระนอง ดินขาวอำเภอบางพลี จังหวัดสมุทรปราการ ควอตซ์ และหินฟีนมา ชนิดคามาโดซึ่งเป็นหินฟีนมาจากประเทศญี่ปุ่น ผลภายหลังการเผาเนื่อดินโบนไชน่าคือ มีความโปร่งแสง และเนื่อดินมีสีฟ้าอ่อน หรือสูตรที่คิดค้นโดยศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (ไพจิตร อังศิริวัฒน์, 2541)ซึ่งมีส่วนผสมคือ เถ้ากระดูก ดินขาว ควอตซ์ และเฟลด์สปาร์ ผลภายหลังการเผาเนื่อดินโบนไชน่าคือ มีความโปร่งแสง เนื่อดินมีสีขาว และยังมีงานวิจัยอีกมากศึกษาเกี่ยวกับเนื่อดินโบนไชน่า โดยส่วนมากจะใช้ เถ้ากระดูก ดินขาว ควอตซ์ และเฟลด์สปาร์ เป็นส่วนผสมหลัก (บุญธรรม เรือการ, 2523) (วรุณี ธีรมงคล และคณะ, 2531) ดังนั้นจากการทบทวนเอกสาร พบว่างานวิจัยเรื่องเนื่อดินโบนไชน่ายังคงใช้ เฟลด์สปาร์ ควอตซ์ และดินหรือวัตถุดิบจากต่างประเทศเป็นวัตถุดิบหลัก แต่เนื่องจากเฟลด์สปาร์เป็นวัตถุดิบที่มีราคาค่อนข้างสูง (ราคาตันละ 7,350 บาท ;ข้อมูลโดยบริษัทชิเบลโก) ดังนั้นหากสามารถนำวัตถุดิบที่มีองค์ประกอบทางเคมีและมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับหินคอร์นิช แต่ราคาถูกกว่าเฟลด์สปาร์ และมีในประเทศมาใช้ในเนื่อดินโบนไชน่า จะเป็นการลดต้นทุนการผลิต ผลิตภัณฑ์โบนไชน่าลงไปได้อีก และเป็นประโยชน์อย่างยิ่งกับอุตสาหกรรมเซรามิก

จากการศึกษาเบื้องต้นพบว่าวัตถุดิบจากแหล่งภูเขาจังหวัดลำปางนั้น ประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นหินแข็ง หินผุ และเนื่อดิน ในการใช้ประโยชน์จากดินและหินผูลำปางในการผลิตเซรามิกนั้น ที่ผ่านมา จะทำโดยนำดินดิบมาผ่านกระบวนการล้างเพื่อคัดแยกเอาเฉพาะเนื่อดินละเอียดหรือดินขาวลำปางมาใช้งาน หินผุส่วนที่แข็งมักถูกคัดทิ้ง ปัจจุบันหินผูก็นำมาใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตกระเบื้องเคลือบหรือเครื่องสุขภัณฑ์ (กาญจนา อินทรชิต, 2536)

จากผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี และ คุณสมบัติทางแร่เบื้องต้นพบว่าในหินผุมิแร่ ควอตซ์ อิลไลต์ เฟลด์สปาร์ และ เคโอลิไนต์ นอกจากนั้นหินผุมิคุณสมบัติอื่นคือมีสีขาว ซึ่งเหมาะที่จะใช้ทดแทนหินคอร์นิชในเนื่อดินโบนไชน่า ผู้วิจัยจึงคาดว่ามีความเป็นไปได้ที่จะสามารถนำมาเป็นส่วนผสมในเนื่อดินโบนไชน่า ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพดีที่สุดในบรรดาผลิตภัณฑ์ประเภทเนื่อสีขาวละเอียด โดยใช้หินผุที่มีคุณภาพดีเพื่อควบคุมสิ่งปนเปื้อนต่างๆที่ส่งผลต่อความขาวของเนื่อผลิตภัณฑ์ ปัจจุบันหินผุมิราคาอยู่ที่ ตันละ 1,500 บาท ข้อมูลโดยบริษัท ภัทรารัตน์เคลย์แอนมิ

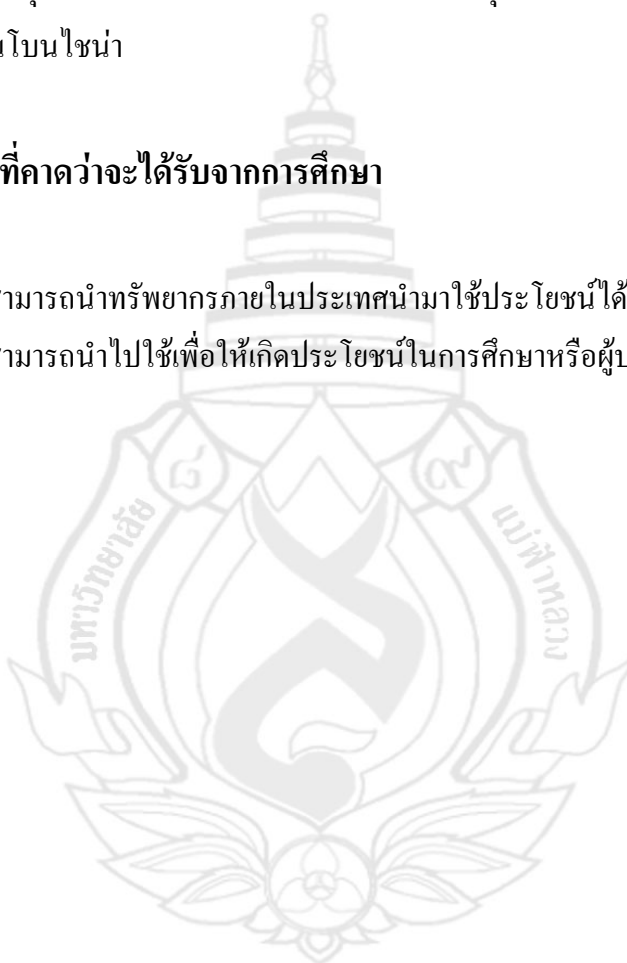
เนอรัล จำกัด ดังนั้นงานวิจัยนี้ผู้วิจัยจึงสนใจที่จะศึกษาการนำหินผุลำปางมาใช้เป็นส่วนผสมในเนื้อดินโบนไชนาร่วมกับวัตถุดิบอื่นๆ คือ เถ้ากระดูก ดินขาว และเฟลด์สปาร์

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและโครงสร้างทางจุลภาค จากการใช้หินผุเป็นตัวหลอมละลายในเนื้อดินโบนไชนา

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการศึกษา

- 1.3.1 สามารถนำทรัพยากรภายในประเทศนำมาใช้ประโยชน์ได้สูงสุด
- 1.3.2 สามารถนำไปใช้เพื่อให้เกิดประโยชน์ในการศึกษาหรือผู้ประกอบการทางเซรามิก



บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เนื้อดินโบนไชน่า (Bone china)

ผลิตภัณฑ์โบนไชน่าตามมาตรฐานการทดสอบของอเมริกัน (ASTM-C242) หมายถึง ผลิตภัณฑ์สีขาวชนิดโปร่งแสงซึ่งมีส่วนผสมของเถ้ากระดูกอย่างน้อยร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก

ตอนต้นคริสต์ศตวรรษที่ 18 ในประเทศอังกฤษได้มีการคิดค้นเนื้อดินพอร์ซเลนอุณหภูมิต่ำ โดยใช้ดินขาว แก้ว ทราย และโพแทสเซียมคาร์บอเนตเป็นวัตถุดิบ ประมาณ ค.ศ.1745 – 1755 ต่อมาหลังปี ค.ศ.1760 ได้มีผู้คิดค้นนำ เถ้ากระดูกมาผสมในเนื้อดินขาวในอัตราส่วนต่างๆ สูตรของเนื้อดินยังถูกปกปิดเป็นความลับ จนกระทั่งในปี ค.ศ.1794 นายโจเซฟ สโปก ได้ตั้งโรงงานผลิตโบนไชน่าเป็นอุตสาหกรรมด้วยขนาดใหญ่ว่า ประเทศอังกฤษจึงนับว่าเป็นต้นกำเนิดของเนื้อดินโบนไชน่าที่มีสีขาวโปร่งแสง มีความขาว และความแข็งแรง มีความสวยงามน่าใช้ และมีการผลิตอยู่จนกระทั่งทุกวันนี้ แต่ในปัจจุบันผลิตภัณฑ์โบนไชน่ามีการผลิตอย่างกว้างขวางในหลายประเทศ (ไพจิตร อังศิริวัฒน์, 2541)

เนื้อดินโบนไชน่า มีเถ้ากระดูกผสมในปริมาณสูง ซึ่งเถ้ากระดูกมีสมบัติเป็นตัวช่วยลดจุดหลอมเหลว ดังนั้นเมื่อนำไปเผาที่อุณหภูมิประมาณ 1,250 องศาเซลเซียส เนื้อเซรามิกจะเกิดความโปร่งแสง และเงาวาว นอกจากนี้ยังมีความแข็งแรงทนทานมากอีกด้วย ซึ่งตรงข้ามกับลักษณะที่เห็น ที่รู้สึกเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีเนื้ออบบาง นุ่มนวล ซึ่งเมื่อเทียบอุณหภูมิการเผาระหว่างผลิตภัณฑ์โบนไชน่า กับผลิตภัณฑ์พอร์ซเลนแล้ว ผลิตภัณฑ์โบนไชน่า จะเผาที่อุณหภูมิต่ำกว่าผลิตภัณฑ์พอร์ซเลน แต่สมบัติของผลิตภัณฑ์โบนไชน่าจะดีกว่า (ชนสรณ์ โสคติโสภา, 2545)

2.2 วัตถุดิบสำหรับเนื้อดินโบนไชน่า

วัตถุดิบทุกชนิดที่ใช้เตรียมเนื้อดินโบนไชน่าจะต้องมีความขาวภายหลังการเผา หากวัตถุดิบมีมลทินเจือปนอยู่มากสีของเนื้อดินจะหมองคล้ำหลังการเผา ดังนั้นการเตรียมวัตถุดิบจะต้องเน้นที่ความบริสุทธิ์หรือความขาวของวัตถุดิบ แต่ต้องให้ความเหนียวพอที่จะขึ้นรูปเป็นภาชนะต่างๆได้ บางครั้งมีการเติมดินดำ เพื่อเพิ่มความเหนียว แต่ถ้าใส่ดินดำในปริมาณสูงสีดินหลังการเผาจะไม่ค่อยขาวและไม่โปร่งแสง ดังนั้นจึงใช้วัตถุดิบที่มีความเหนียว เช่น ดินเบนโตไนต์หรืออินทรีย์สารประเภททากบางชนิด เพื่อเพิ่มความเหนียวในเนื้อดินด้วย (ไพจิตร อังศิริวัฒน์, 2541)

วัตถุดิบในเนื้อดินโบนไชน่า ตามสูตรมาตรฐานของประเทศอังกฤษประกอบด้วย ถ้ำกระดูก ดินขาว หินคอร์นิช ส่วนงานวิจัยในเมืองไทยวัตถุดิบในการทำเนื้อดินโบนไชน่าประกอบด้วย ถ้ำกระดูก ดินขาว เฟลด์สปาร์ ควอตซ์ (วัชร ประกาย, 2549ก)

2.2.1 ถ้ำกระดูก (Bone ash)

ถ้ำกระดูกเป็นวัตถุดิบที่ใช้เตรียมเนื้อดินโบนไชน่าโดยเฉพาะ ทำมาจากถ้ำกระดูกของวัวหรือควาย ที่มีขนาดใหญ่นำมาต้มจนเปื่อย ล้างเอาไขกระดูก เอ็น และอินทรีย์สารออก จากนั้นกระดูกถูกนำมาเผาในอุณหภูมิประมาณ 900 องศาเซลเซียส ในบรรยากาศสันดาปสมบูรณ์ เพื่อเผาไหม้อินทรีย์สารในกระดูกให้กลายเป็นถ้ำกระดูก ปริมาณของอินทรีย์สารที่เหลือค้างในถ้ำกระดูกมีความสำคัญมาก ถ้ามีอยู่มากเกินไปจะทำให้เกิดฟองมากเมื่อนำมาเตรียมน้ำดินหล่อ ซึ่งต้องนำมาผสมกับวัตถุดิบอื่นที่มีค่าเจือปน ดังนั้นปริมาณอินทรีย์สารที่ตกค้างอยู่ในถ้ำกระดูกหลังการเผาต้องควบคุมให้อยู่ในปริมาณที่พอดี เพราะอินทรีย์สารช่วยเพิ่มความเหนียวในเนื้อดินได้ การควบคุมการเผาต้องให้ถ้ำกระดูกมีความถ่วงจำเพาะประมาณ 1.8 – 2.00 ซึ่งเป็นเกณฑ์มาตรฐานของโรงงานที่ผลิตถ้ำกระดูกขาย ในประเทศอังกฤษเนื้อดินโบนไชน่าจะต้องเลือกกระดูกสัตว์ชนิดที่มีแร่เหล็กปนอยู่ในปริมาณน้อย เช่น กระดูกวัวและกระดูกควาย ส่วนกระดูกม้าและกระดูกหมูมีแร่เหล็กปนอยู่มากทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีสีเหลืองหมองคล้ำไม่ขาวบริสุทธิ์เหมือนกระดูกวัวและควาย ในถ้ำกระดูกประกอบด้วยแคลเซียมฟอสเฟต (Calcium phosphate) 67 – 85 เปอร์เซ็นต์ แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate) 3-10 เปอร์เซ็นต์ แมกนีเซียมฟอสเฟต (Magnesium phosphate) 2- 3 เปอร์เซ็นต์ และมีค่าที่ละลายน้ำได้พวกแคลเซียมฟลูออไรด์และคอสติคไลม์อีกเล็กน้อย (ไพจิตร อังศิริวัฒน์, 2541)

ลักษณะที่สำคัญของเถ้ากระดูก

1. ขนาดอนุภาค (Particle size)

เถ้ากระดูกต้องบดละเอียดจนมีขนาดเล็กกว่า 10 ไมครอน อยู่ 70 – 80 เปอร์เซ็นต์ ถ้าวัตถุดิบบดไม่ละเอียดพอ ตัวอย่างเช่น มีขนาดเถ้ากระดูกที่เล็กกว่า 10 ไมครอนไม่ถึง 70 เปอร์เซ็นต์ เนื้อดินที่ผสมจะมีความเหนียวไม่พอ ใช้ขึ้นรูปไม่ได้ เมื่อเผาแล้ว เนื้อดินไม่หลอมละลายและมีความแข็งแรงน้อย แต่ถ้าบดละเอียดมากเกินไป จนมีเถ้ากระดูกเล็กกว่า 10 ไมครอน เกิน 80 เปอร์เซ็นต์ ขึ้นไป การหล่อแบบจะทำให้ช้าลง เนื้อดินจะยังมีช่วงอุณหภูมิในการเผากัก ขุดตัวได้ง่ายหลังการเผา (ไพจิตร อังศิริวัฒน์, 2541)

2. การสูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้ (Loss on ignition)

เถ้ากระดูกที่เผาเกินอุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ก่อนนำมาบดให้ละเอียด พบว่าเถ้ากระดูกไม่มีอินทรีย์สารใดๆ หลงเหลืออยู่เลยเรียกว่าเผาเผา (Dead burnt) นำมาใช้ไม่ได้ ดังนั้นจึงมีการกำหนดมาตรฐานเถ้ากระดูกหลังเผาคือ ก่อนเผามีน้ำหนัก 100 กรัม หลังการเผาที่ 850 – 900 องศาเซลเซียส ต้องตรวจสอบน้ำหนักให้หายไปประมาณ 15 กรัม เหลือน้ำหนัก 85 กรัม ภายหลังการเผา ปริมาณอินทรีย์สารในเถ้ากระดูกมีความสำคัญต่อความเหนียวของเนื้อดินและความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์ แต่ถ้าเถ้ากระดูกมีค่าความถ่วงจำเพาะมากเกินไป หรือเผาดำกว่ากำหนด เนื้อดินจะมีความเหนียวและความแข็งแรงก่อนเผาดี แต่ระยะเวลาการเทน้ำดินหล่อยาวนานขึ้น ดินสุกตัวก่อนกำหนด อาจเกิดการขุดตัวเสียรูปทรง การหดตัวภายหลังการเผาสูงมากขึ้น เถ้ากระดูกที่เผาแล้วน้ำหนักหายไปหลังการเผาน้อยกว่า 1 เปอร์เซ็นต์ เมื่อนำมาเตรียมเนื้อดินจะมีปัญหาเปราะแตกง่าย ดินมีความเหนียวน้อย ระยะเวลาในการหล่อแบบสั้น ถ้าต้องการเผาให้สุกตัวไปเร่งแสงต้องเพิ่มอุณหภูมิในการเผามากกว่าปกติ (ไพจิตร อังศิริวัฒน์, 2541)

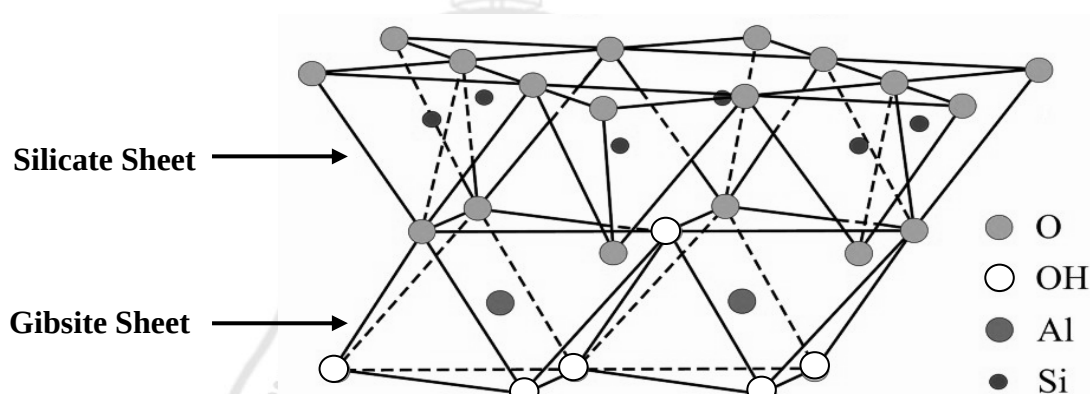
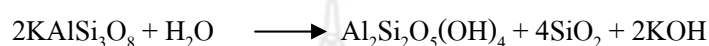
2.2.2 ดินขาว (Kaolin, China clay)

ดร.ณิ วัฒนศิริเวช และคณะ (2546) ได้ให้ความหมายของดินขาว (Kaolin, China clay) คือ ดินที่มีสีขาวหรือสีซีดจาง ทั้งในสภาพที่ยังไม่ได้เผา และเผาแล้ว เป็นดินที่เกิดในช่วงแรก (Primary clay) ดินขาวมีส่วนประกอบหลักเป็นแร่กลุ่มเคโอลิไนต์ ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) และมีมัสโคไวต์ ไมกา อิลไลต์ ควอตซ์ มอนต์มอริลโลไนต์ เป็นแร่ที่ประกอบอยู่ในดินด้วย ถ้าหากดินขาวมีเหล็ก ออกไซด์ ทิเทเนียม ปะปนอยู่สูงจะมีผลต่อสีของดินทำให้ดินมีสีเหลือง น้ำตาล และแดง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณออกไซด์ที่เจือปนอยู่ในดิน ดินขาวมีความเหนียวต่ำและความทนไฟสูง ดินขาวที่พบโดยทั่วไปจะมีอยู่ 2 แหล่งคือ

1. ดินขาวแหล่งกำเนิด (Residual kaolin) จะพบตกค้างอยู่ในหิน Pegmatite ส่วนใหญ่ ประกอบไปด้วย หินฟันม้า (Feldspar) และ ควอตซ์ (Quartz)

2. ดินขาวตกตะกอน (Sedimentary kaolin) ประกอบไปด้วยอนุภาคของดินที่ถูกพัดพามาจากแหล่งกำเนิด เช่น อาจถูกพัดมาด้วยกระแสน้ำแล้วตกตะกอนในที่ที่มีน้ำนิ่ง

แร่เคโอลินินต์เกิดจากการสลายตัวของหินแกรนิต ซึ่งหินแกรนิตมีส่วนประกอบแร่เฟลด์สปาร์ ไมก้า ควอตซ์ และเนื่องจากแร่เฟลด์สปาร์มีความเสถียรน้อยที่สุดในอากาศและน้ำ จึงทำให้เกิดการสลายตัวได้ง่ายที่สุด ซึ่งสามารถเขียนปฏิกิริยาการสลายตัวได้คือ (Lawrence, 1972)



ภาพที่ 2.1 โครงสร้างสามมิติของเคโอลินินต์

การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของดินขาว

ดินขาวเมื่อได้รับความร้อนจะทำให้มีการเปลี่ยนแปลงของแต่ละช่วงอุณหภูมิที่ต่างกันดังนี้ (Lawrence, 1972)

อุณหภูมิ 100 – 200 องศาเซลเซียส เกิดปฏิกิริยาสูญเสียน้ำ เนื่องจากการหายไปของน้ำอิสระที่ถูกดูดซับอยู่บนพื้นผิวของอนุภาค

อุณหภูมิ 300 – 500 องศาเซลเซียส เกิดปฏิกิริยาสูญเสียน้ำ เนื่องจากการหายไปของพวกอินทรีย์สารที่อยู่ในดิน

อุณหภูมิ 450 – 600 องศาเซลเซียส เกิดปฏิกิริยาสูญเสียน้ำ เนื่องจากการหายไปของน้ำที่อยู่ในโครงสร้างผลึกของดินคิดเป็นร้อยละ 13.95 ทำให้โครงสร้างของผลึกของดินเปลี่ยนไปเป็นเมตะเคโอลิน (Metakaolin)

อุณหภูมิ 980 องศาเซลเซียส เกิดปฏิกิริยาคายพลังงาน เนื่องจากการเปลี่ยนโครงสร้างของเมตะเคโอลินเป็นสปิเนล (Spinel) พร้อมกับการปล่อยซิลิกาอิสระออกมา

อุณหภูมิ 1,050 – 1,100 องศาเซลเซียส เกิดปฏิกิริยาคายพลังงานเนื่องจากสปิเนลเปลี่ยนเป็นโครงสร้างมัลไลต์พร้อมกับการปล่อยซิลิกาอิสระออกมา

อุณหภูมิ 1,200 – 1,400 องศาเซลเซียส เกิดปฏิกิริยาคายพลังงานเนื่องจากเกิดการโตของผลึกมัลไลต์ ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) และเกิดคริสโตบาไลต์

2.2.3 ตัวหลอมละลาย (Flux)

ฟลักซ์ (Flux) คือวัตถุดิบที่ทำหน้าที่เป็นตัวหลอมละลายช่วยลดอุณหภูมิในการเผา การใช้ตัวหลอมละลายผสมในเนื้อดิน เพื่อให้เนื้อดินสุกตัวในอุณหภูมิที่ต้องการ ตัวหลอมละลายจะทำหน้าที่ประสานผลึกของวัตถุดิบต่างๆ ให้หลอมละลายเป็นเนื้อเดียวกัน ในขณะที่เนื้อดินถูกเผาผ่านความร้อน วัตถุดิบที่เป็นตัวหลอมละลายที่ถูกบดละเอียดผสมอยู่ในเนื้อดินจะเริ่มเกิดการหลอมตัวก่อนแล้วดึงเอาวัตถุดิบทนไฟที่อยู่รอบๆ ผลึกมาหลอมเข้าด้วยกัน ทำให้ช่องว่างที่อยู่ระหว่างอนุภาคของวัตถุดิบหายไปและเนื้อดินเกิดการหดตัวรวมกันหลอมจนเนื้อแน่นคล้ายแก้ว ในระหว่างที่เผาเผาเย็นตัวลงเนื้อดินก็จะค่อยๆ เย็นตัวกลายเป็นของแข็ง

ความพรุนตัวของดินหรือคุณสมบัติของดินภายหลังการเผาขึ้นอยู่กับปริมาณของวัตถุดิบที่เป็นตัวหลอมละลาย ถ้าใช้วัตถุดิบตัวหลอมละลายในปริมาณมากเกินไป ดินอาจยุบตัวภายหลังการเผา ในอุตสาหกรรมการผลิตถ้วยชามด้วยดินขาว ต้องเลือกใช้เฟลด์สปาร์ที่มีแร่เหล็กเจือปนอยู่ในปริมาณน้อยที่สุด เพื่อให้เนื้อดินภายหลังการเผามีสีขาวบริสุทธิ์ตามต้องการ จะต้องเลือกดินที่บริสุทธิ์ และวัตถุดิบอื่นๆ ที่นำมาใช้ผสมในเนื้อดินปั้น เมื่อรวมกันแล้วไม่ควรมีมลทินของแร่เหล็กเกิน 1% เพราะทำให้เนื้อดินหลังเผามีสีหมองคล้ำ (ไพจิตร อังศิริวัฒน์, 2541)

2.2.3.1 หินฟันม้า (Feldspar)

เฟลด์สปาร์เป็นวัตถุดิบที่ช่วยลดอุณหภูมิในการเผาเซรามิก ซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบผสมในเนื้อดิน และน้ำเคลือบได้โดยตรง โดยปกติเฟลด์สปาร์จะเริ่มหลอมเหลวเล็กน้อยที่อุณหภูมิประมาณ 1,150 องศาเซลเซียส โพแทสเซียมเฟลด์สปาร์หลอมเหลวที่อุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียส โซดาเฟลด์สปาร์หลอมเหลวที่อุณหภูมิ 1,170 – 1,200 องศาเซลเซียส แคลเซียมเฟลด์สปาร์หลอมเหลวที่ 1,550 องศาเซลเซียส และแบเรียมเฟลด์สปาร์หลอมเหลวที่ 1,715 องศาเซลเซียส (อายุวัฒน์ สว่างผล, 2543)

โดยทั่วไปแล้ว ในสูตรดินที่ใช้โซดาเฟลด์สปาร์เป็นส่วนประกอบจะมีอุณหภูมิการหลอมตัวต่ำกว่าสูตรดินที่ใช้โพแทสเซียมเฟลด์สปาร์จะมีแนวโน้มที่จะทำให้ชิ้นงานเกิดการบิดเบี้ยวระหว่างการเผาได้ง่ายกว่า เนื่องจากแก้วที่เกิดมาจากโซดาเฟลด์สปาร์มักจะมีค่าน้ำหนักต่ำกว่าที่เกิดจากโพแทสเซียมเฟลด์สปาร์ (ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ [mtec], 2552)

จากการศึกษาของ Das and Dana (2003) ได้ศึกษาผลของการใช้เฟลด์สปาร์ 2 ชนิด คือ โพแทสเซียมและโซเดียมเฟลด์สปาร์ ต่อการหลอมตัวและความหนาแน่นของเนื้อดินพอร์ซเลน พบว่าหลังการเผาที่อุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียส เนื้อดินที่มีโซเดียมเฟลด์สปาร์ผสมอยู่จะมีความหนาแน่นสูงกว่า สมบัติเชิงกลดีกว่า และอุณหภูมิที่หลอมเหลวตัวต่ำกว่าเนื้อดินที่มีโพแทสเซียมเฟลด์สปาร์เป็นส่วนผสม จากการทดลองพบว่าในตอนแรกนั้นเนื้อดินทั้งสองแบบมีชั้นคอนของปฏิกิริยาคลายคลึงกันจนถึงอุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิสูงกว่านี้เฟลด์สปาร์จะเกิดปฏิกิริยาและหลอมเหลว โดยเนื้อดินที่มีโซเดียมเฟลด์สปาร์มีอัตราการเกิดความหนาแน่นสูงสุดที่ 1,171 องศาเซลเซียส ในขณะที่เนื้อดินที่มีโพแทสเซียมเฟลด์สปาร์มีอัตราการเกิดความหนาแน่นสูงสุดที่ 1,195 องศาเซลเซียส

2.2.3.2 หินคอร์นิช (Cornish stone)

หินคอร์นิชคือวัตถุดิบที่ทำหน้าที่เป็นตัวหลอมละลายในเนื้อดินเซรามิกและในเคลือบ หินคอร์นิชมีจุดหลอมละลาย 1,150 – 1,300 องศาเซลเซียส สำหรับการแบ่งเกรดของหินคอร์นิชจะแบ่งตามสีที่พบ ซึ่งประกอบด้วย สีม่วงเข้ม สีม่วงอ่อน และสีเทา หินคอร์นิชทั้งสามเกรดนี้จะมีทั้งเฟลด์สปาร์ ควอตซ์ เคโอลิไนต์ ไมกา ฟลูออสปาร์ และสิ่งเจือปนอื่นๆ เป็นองค์ประกอบอยู่ด้วย โดยหินที่มีสีม่วงจะมีเฟลด์สปาร์เป็นองค์ประกอบอยู่มากที่สุด ส่วนหินที่มีสีเทาก็จะมีเฟลด์สปาร์เป็นองค์ประกอบน้อยที่สุด เพราะฉะนั้นหินที่มีสีม่วงก็จะให้คุณสมบัติความเป็นฟลักซ์ที่แรงที่สุด ส่วนหินที่มีสีเทาก็จะให้คุณสมบัติความเป็นฟลักซ์ที่น้อยที่สุดนั่นเอง โดยลักษณะของสีที่ปรากฏออกมานั้นเกิดจากสิ่งเจือปนที่พบใน ฟลูออสปาร์ (แคลเซียม ฟลูออไรด์, CaF_2) ที่มีอยู่ในหินนั้น ดังนั้นเมื่อปริมาณของเฟลด์สปาร์เพิ่มขึ้น ความสามารถในการเป็นฟลักซ์ของหินก็จะเพิ่มขึ้นซึ่งก็เช่นเดียวกันกับปริมาณของฟลูออสปาร์ที่เพิ่มขึ้น (วัชร ประกาย, 2549ข)

การแบ่งชนิดของหินคอร์นิช จะใช้ปริมาณของหินฟันม้า ที่มีอยู่ในหินคอร์นิชเป็นเกณฑ์ โดยแบ่งเป็น 4 ชนิด คือ

1. ฮาร์ด เพอร์เพิล (Hard purple) เป็นตัวที่สามารถหลอมเหลวได้ดีที่สุด เนื่องจากเป็นชนิดที่มีหินฟันม้าสูงที่สุด

2. ไมค์ เพอร์เฟิล (Mild purple) มีเฟลด์สปาร์ผสมอยู่น้อย และมีดินขาวมาก และมีจุดหลอมเหลวสูง

3. ครายไวต์ (Dry white) ยังคงมีเฟลด์สปาร์ผสมอยู่น้อย มีดินขาวมากและมีจุดหลอมเหลวสูง แต่มีความแข็งน้อยกว่า ฮาร์ด เพอร์เฟิล และไมค์ เพอร์เฟิล

4. บัฟฟิสโตน (Buff stone) เนื้อแร่มีสีเหลืองอ่อนเนื่องจากมีสารประกอบของเหล็ก จึงไม่เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความขาว

ตารางที่ 2.1 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของ หินคอร์นิช (Grimshaw Rex, 1971)

ชนิดของ หินคอร์นิช	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Loss
ฮาร์ด เพอร์เฟิล	71.7	15.6	0.2	0.1	2.0	0.1	4.0	4.7	1.4
ไมค์ เพอร์เฟิล	72.4	15.8	0.2	0.1	1.8	0.2	3.5	4.0	1.9
ครายไวต์	73.2	16.9	0.1	0.1	1.1	0.1	2.0	3.8	2.7
บัฟฟิสโตน	71.9	16.5	0.5	0.2	0.9	0.2	2.2	3.8	3.8

ตารางที่ 2.2 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ของหินคอร์นิช (Grimshaw Rex, 1971)

ชนิดของ หินคอร์นิช	ควอตซ์	อิลไลต์	เคโอลิไนต์	เฟลด์สปาร์	แร่อื่นๆ
ฮาร์ด เพอร์เฟิล	30.1	21.3	0.6	45	3.0
ไมค์ เพอร์เฟิล	28.2	23.5	2.3	41	4.0
ครายไวต์	36.4	26.0	9.6	25	3.0
บัฟฟิสโตน	26.5	32.7	5.8	30	5.0

แร่อื่นๆ ประกอบด้วย ฟลูออสปาร์ โทแพซ อพาไทต์ ทัวมาลีน รูไทล์

หินคอร์นิชมีความสำคัญคือ เป็นวัตถุดิบที่ใช้แทนเฟลด์สปาร์ในอุตสาหกรรมพอร์ซเลน ไซนาแวร์ เซิร์ทเทินแวร์ และสโตนแวร์ เนื่องจากการหลอมเหลวได้ดีกว่าเฟลด์สปาร์

บ่อยครั้งที่นำหินคอร์นิชและเฟลด์สปาร์มาใช้ร่วมกันในน้ำเคลือบ หินคอร์นิชประกอบด้วย ซิลิกา อลูมินา และโพแทสเซียม อยู่ในอัตราส่วนที่เหมาะสม เป็นตัวที่ทำให้เกิดแก้วได้ดี ส่วนในเนื้อดิน จะหลอมเหลวช้า และเมื่อเย็นตัวลงจะมีความแข็งและความหนาแน่นขึ้น (Grimshaw Rex, 1971)

2.2.3.3 อิลไลต์ (Illite)

อิลไลต์ ($K_{1.5-1.0} Al_4 [Si_{6.5-7.0} Al_{1.5-1.0} O_{20}](OH)_4$) เป็นกลุ่มของแร่มีโครงสร้างคล้ายกับ ไมกา แต่มีโพแทสเซียมน้อยกว่าและมีน้ำมากกว่าไมกา อิลไลต์มีขนาดอนุภาคเล็กมาก ประมาณ 0.05 ไมครอน มีความเหนียวเพียงเล็กน้อย มีความทนไฟต่ำ (Worrall, 1982)

จากการศึกษาของ Wattanasiriwech, D., Srijun, K., and Wattanasiriwech, S. (2008) การเกิดเนื้อแก้วจากอิลไลต์ของดิน โดยอิลไลต์มีขนาดอนุภาคที่เล็ก มีองค์ประกอบคือโพแทสเซียม ในปริมาณสูง ประกอบกับมีจุดหลอมเหลวต่ำ จึงมีความเป็นไปได้ที่อิลไลต์ทำหน้าที่เป็นตัวหลอม ละลายในเนื้อดิน ดังนั้นการศึกษาดินมาเลเซียซึ่งมีปริมาณอิลไลต์อยู่ประมาณ 23 เปอร์เซ็นต์ เคโอลิไนต์ 41 เปอร์เซ็นต์ อะนอร์ไทต์ 2 เปอร์เซ็นต์ เฮมาไทต์ 3 เปอร์เซ็นต์ รูไทล์ 1 เปอร์เซ็นต์ และ ควอตซ์ 30 เปอร์เซ็นต์ พบว่าหลังการเผาเนื้อดินที่อุณหภูมิ 800 -1,250 องศาเซลเซียส เนื้อดินเริ่มมีการหดตัวประมาณ 7-8 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 900 -1,000 องศาเซลเซียส และมีการหดตัวเพิ่มขึ้น เป็น 13.4 และ 17.7 เปอร์เซ็นต์ หลังเผาที่ 1,100 -1,200 องศาเซลเซียส จากผลการทดลองจึงสรุปได้ ว่าเนื้อดินเริ่มเกิดเป็นเนื้อแก้วที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส และเกิดความหนาแน่นมากที่สุดที่ อุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียส ซึ่งผลการวัดค่าการหดตัวแสดงถึงการเกิดความหนาแน่นของเนื้อดิน อีกด้วย ดังนั้นอิลไลต์จึงแสดงพฤติกรรมการเป็นตัวหลอมละลายที่ดี

จากการศึกษาของ Ferrari and Gualtieri (2006) การใช้อิลไลต์ในกระเบื้องสโตนแวร์ โดยเชื่อว่าอิลไลต์เป็นตัวที่ช่วยทำให้เกิดแก้ว และศึกษาผลจากปริมาณอิลไลต์ที่แตกต่างกันในดิน 8 แหล่ง คือ สาธารณรัฐเชก (5.4 %) สหรัฐอเมริกา (5.5%) ฝรั่งเศส (14.0%) ยูเครน (32.9%) ตุรกี (24.1, 27.6 %) และฮังการี (70, 62%) ทดสอบสมบัติทางกายภาพหลังการเผา พบว่าดินที่มีปริมาณ อิลไลต์เพิ่มขึ้นจะมีเฟสแก้วเพิ่มขึ้นและมีมากที่สุดประมาณ 77 เปอร์เซ็นต์ในดินฮังการีซึ่งมีปริมาณ อิลไลต์อยู่ 70 เปอร์เซ็นต์ การดูดซึมน้ำลดลง การหดตัวเพิ่มขึ้น เมื่อมีอิลไลต์มากขึ้นเช่นกัน หลังจากนั้นนำดินแต่ละแหล่งผสมกับ อัลไบต์ เฟลด์สปาร์ ควอตซ์ ในอัตราส่วนเท่ากัน ผลการ ทดลองหลังการเผาพบว่าเนื้อดินจากสาธารณรัฐเชกและเนื้อดินสหรัฐอเมริกาสุกตัวที่อุณหภูมิ 1,220 องศาเซลเซียส เนื้อดินฝรั่งเศส ตุรกีและยูเครนสุกตัวที่อุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียส เนื้อดิน

ฮังการีสูงตัวที่อุณหภูมิ 1,180 องศาเซลเซียส ดังนั้นซิลิกาทำให้เกิดเนื้อแก้ว และพบว่าเนื้อดินฮังการีมีปริมาณของเฟสแก้วสูงที่สุดประมาณ 82 เปอร์เซ็นต์

2.2.4 ควอตซ์ (Quartz)

ควอตซ์ (Quartz) มีสูตรทางเคมีคือ SiO_2 โดยปกติในดินและเฟลด์สปาร์จะมีซิลิกาเป็นองค์ประกอบในสูตรเคมีอยู่แล้ว ยังมีแร่ควอตซ์ที่เจือปนมากับดินที่เกิดในที่ราบลุ่มหรือดินตะกอน และควอตซ์บดละเอียดที่เพิ่มเข้าไปไม่ได้อยู่ในโครงสร้างของดิน จะเรียกว่า ควอตซ์อิสระ (Free quartz) ซึ่งการมีควอตซ์อิสระในเนื้อดินทำให้ความเหนียวลดลง การหดตัวเมื่อแห้งและหลังเผา ลดลง และในบางกรณีอาจทำให้ลดความแข็งแรงหรือเพิ่มความทนไฟขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาคที่ใช้และปริมาณของตัวหลอมละลายที่ผสมอยู่ในดินด้วย (Grimshaw, 1971)

ควอตซ์เมื่อโดนเผาผ่านความร้อนจะเปลี่ยน โครงสร้างของรูปผลึกอยู่หลายช่วงอุณหภูมิ การเผา โดยอะตอมของรูปผลึกถูกจัดเรียงตัวใหม่จากรูปแบบหนึ่ง เปลี่ยนแปลงเป็นอีกแบบหนึ่ง แต่ละแบบจะสามารถคงสภาพอยู่ในช่วงอุณหภูมิหนึ่ง ที่อุณหภูมิปกติควอตซ์จะอยู่ในรูปของ แอลฟาควอตซ์ซึ่งมีโครงสร้างผลึกเป็นเตตระฮีดรอล (Tetrahedral) เมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ 573 องศาเซลเซียส จะเปลี่ยนโครงสร้างผลึกเป็นบีตาควอตซ์ และมีการขยายตัว ที่อุณหภูมิ 870 องศาเซลเซียส เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นถึง 1,470 องศาเซลเซียส จะเปลี่ยนโครงสร้างเป็นบีตาคริสโตบาไลต์ จนในที่สุดเมื่ออุณหภูมิสูงถึง 1,723 องศาเซลเซียส คริสโตบาไลต์จะหลอมตัวทำให้เกิดเป็นเนื้อแก้วซิลิกา (Worrall, 1982)

2.3 หินผุ (Pottery stone)

หินผุ คือหินแกรนิตที่ทับถมกันนานนับล้านๆ ปี บางส่วนได้กลายเป็นแร่เคโอลิไนต์ บางส่วนยังเป็นแร่เฟลด์สปาร์ หินผุนี้นำนามาคให้ละเอียดได้ง่ายกว่าเฟลด์สปาร์ มีความแข็งน้อย มีจุดหลอมเหลวประมาณ 1,200 – 1,300 องศาเซลเซียส ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณของแอลคาไลน์ในแต่ละแหล่ง หินผุนิยมนำมาใช้ผสมในเนื้อดินปั้นแทนเฟลด์สปาร์ มีจุดหลอมเหลวกว้างกว่าเฟลด์สปาร์ เนื่องจากมีดินขาวอยู่ด้วย ทำให้มีความทนไฟสูงกว่าเฟลด์สปาร์ หินเหล่านี้เป็นวัตถุดิบที่ให้ แร่ไมก้า เคโอลิไนต์ เฟลด์สปาร์ และควอตซ์ รวมกัน (ไพจิตร อังศิริวัฒน์, 2541)

การเกิดหินผุมี 2 ลักษณะ คือ

1. เกิดจากหินต้นกำเนิดที่เป็นหินหนืดที่แทรกดันตัวผ่านหินท้องที่ ขึ้นสู่ผิวโลก แล้วเกิดการเปลี่ยนแปลงภายในด้วยตัวเองจนกลายเป็นหินผุ จะสังเกตเห็นว่า หินท้องที่จะมีลักษณะแตกต่างหรือเป็นคนละประเภทกับหินต้นกำเนิด

2. เกิดจากหินหนืดที่ถูกดันตัวและเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง โดยการพัดพาของน้ำร้อนจนกลายเป็นหินต้นกำเนิดที่เป็นหินผุ (หินท้องที่มักเป็นหินภูเขาไฟ หรือหินจี๊ถ้าภูเขาไฟ) การเกิดประเภทนี้ หินท้องที่และหินต้นกำเนิดจะเป็นหินประเภทเดียวกันและมักจะจับตัวกันเป็นพื้นที่กว้าง ในอุตสาหกรรมเซรามิกนิยมใช้หินผุ ในการทำน้ำเคลือบและเนื้อเซรามิก

สำหรับประเทศไทยพบหินผุอยู่หลายแหล่ง แต่แหล่งที่นิยมนำมาใช้ในอุตสาหกรรมเซรามิกได้แก่ที่จังหวัดลำปางมีชื่อทางการค้าว่าพอตเตอร์สโตน โดยมีลักษณะเด่นดังต่อไปนี้ (Kuchina Shigiji, 2538)

1. มีไฟไรต์ปริมาณต่ำมาก (Iron sulphate: FeS_2) ซึ่งไฟไรต์เป็นตัวทำให้เกิดดำหนีสดำ
2. มีลักษณะเด่นของโครงสร้างทางแร่ดังนี้

2.1 ในส่วนที่อ่อนจะมีควอตซ์ และไมก้าเป็นส่วนประกอบหลัก มีดินขาวเพียงเล็กน้อย

2.2 ในส่วนที่แข็งมักจะมีหินฟันม้าปนอยู่ และเป็นหินฟันม้าชนิดโซดาเฟลด์สปาร์

2.3 บางครั้งจะพบว่ามีมอนทอมอริลโลไนต์ ปนอยู่ด้วย

3. หินผุส่วนที่อ่อนสามารถบดเปื่อยได้ง่าย

4. หินผุจะมีเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) ปนอยู่ประมาณ 0.5 เปอร์เซ็นต์

หินผุจะทำหน้าที่เป็นตัวลดจุดหลอมเหลว เช่นเดียวกับหินฟันม้า แต่หินผุจะมีจุดหลอมเหลวสูงกว่า และมีโอกาสทำให้ผลิตภัณฑ์บิดเบี้ยวต่ำกว่าหินฟันม้า จึงนิยมใช้หินผุร่วมกับหินฟันม้าทั้งในน้ำเคลือบและเนื้อเซรามิกเพราะหินผุเป็นแร่ที่ทำให้ ซิลิกา อลูมินา และโพแทสเซียมในอัตราส่วนที่เหมาะสมเพื่อให้เกิดแก้วคุณภาพดี และช่วยหลอมละลายสารอื่นๆ ช่วยเพิ่มความหนาแน่นและทำให้ความแข็งแรงหลังการเผาสูงขึ้น (Kuchina Shigiji, 2538)

คุณภาพของหินผุและการใช้งาน (บริษัท ภัทรารัตน์เคลย์แอนมิเนอรัล จำกัด)

เกรด A ใช้สำหรับอุตสาหกรรมเซรามิกประเภทถ้วยชาม ที่ต้องการความขาว

เช่นเนื้อดินพอร์ซเลน

เกรด B ใช้ในอุตสาหกรรมกระเบื้องปูพื้น กระเบื้องบุผนัง โมเสก ถ้วยชาม

ประเภทสโตนแวร์

เกรด C ใช้ในอุตสาหกรรมกระเบื้องปูพื้น กระเบื้องบุผนัง โมเสก และอิฐทนไฟ

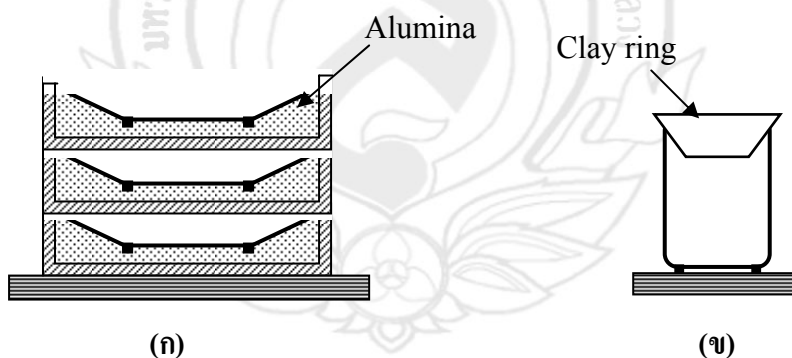
2.4 ขั้นตอนการผลิตโบนโซนา

2.4.1 การเตรียมเนื้อดิน

การเตรียมเนื้อดินเมื่อซังวัตถุดิบแต่ละชนิดตามน้ำหนักแห้งแล้วนำวัตถุดิบแต่ละชนิดมาบดเปียกด้วยหม้อบดจนมีขนาดละเอียดตามมาตรฐานที่กำหนด เมื่อบดวัตถุดิบทุกตัวละเอียดดีแล้ว การเตรียมน้ำดินหล่อหรือการเตรียมเนื้อดินจิกเกอร์จะใช้วัตถุดิบที่บดแล้วมาทวนในบ่อทวนให้เข้ากัน แยกน้ำออกจากดินด้วยเครื่องอัด เมื่อได้ดินแผ่นนำไปนวดและหมักก่อนใช้ นำดินแผ่นที่อัดได้ดีกับน้ำในถังทวนเร็วให้เป็นดินหล่อที่ผสมกับตัวช่วยกระจายเพื่อป้องกันการตกตะกอน (ไพจิตร อังศิริวัฒน์, 2541)

2.4.2 การเผาดิบ

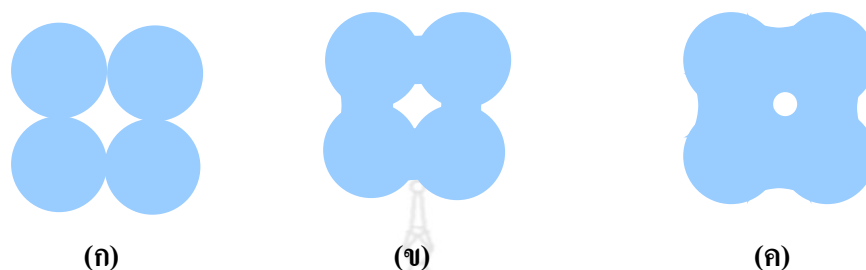
เนื่องจากเนื้อดินโบนโซนาเป็นเนื้อดินที่ง่ายต่อการบิดเบี้ยวและมีการหดตัวสูงภายหลังการเผาดังนั้นในการเผาดิบผลิตภัณฑ์ต้องใช้ความพิถีพิถัน ต้องจัดเตรียมที่รองรับผลิตภัณฑ์ (Setter) ให้ดีเช่น ผลิตภัณฑ์ประเภทจานจะต้องใช้ผงอลูมินาเป็นฐานรองจานแสดงดังภาพที่ 2.2 (ก) สำหรับผลิตภัณฑ์ประเภทแก้วจะใช้ clay ring แสดงดังภาพที่ 2.2 (ข) (ไพจิตร อังศิริวัฒน์, 2541)



ภาพที่ 2.2 การวางผลิตภัณฑ์โบนโซนาสำหรับเผาดิบ

การเปลี่ยนแปลงของเนื้อผลิตภัณฑ์ระหว่างการเผาซินเตอร์ (Sinter) เป็นการเผาที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมเหลว เกิดการประสานกันของอนุภาค โดยกระบวนการแพร่ของอะตอมในสภาพของแข็ง (Diffusion in solid state) ลักษณะรูพรุน (Pore size) มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ความ

แข็งแรงสูงขึ้น เป็นกระบวนการที่อาศัยการเปลี่ยนแปลงในสภาพของแข็ง ทำให้ช่องว่างระหว่างอนุภาคของสารประกอบลดลง (Reed, 1994) ดังภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 แสดงการเปลี่ยนแปลงของอนุภาคในระหว่างการเผาซินเตอร์

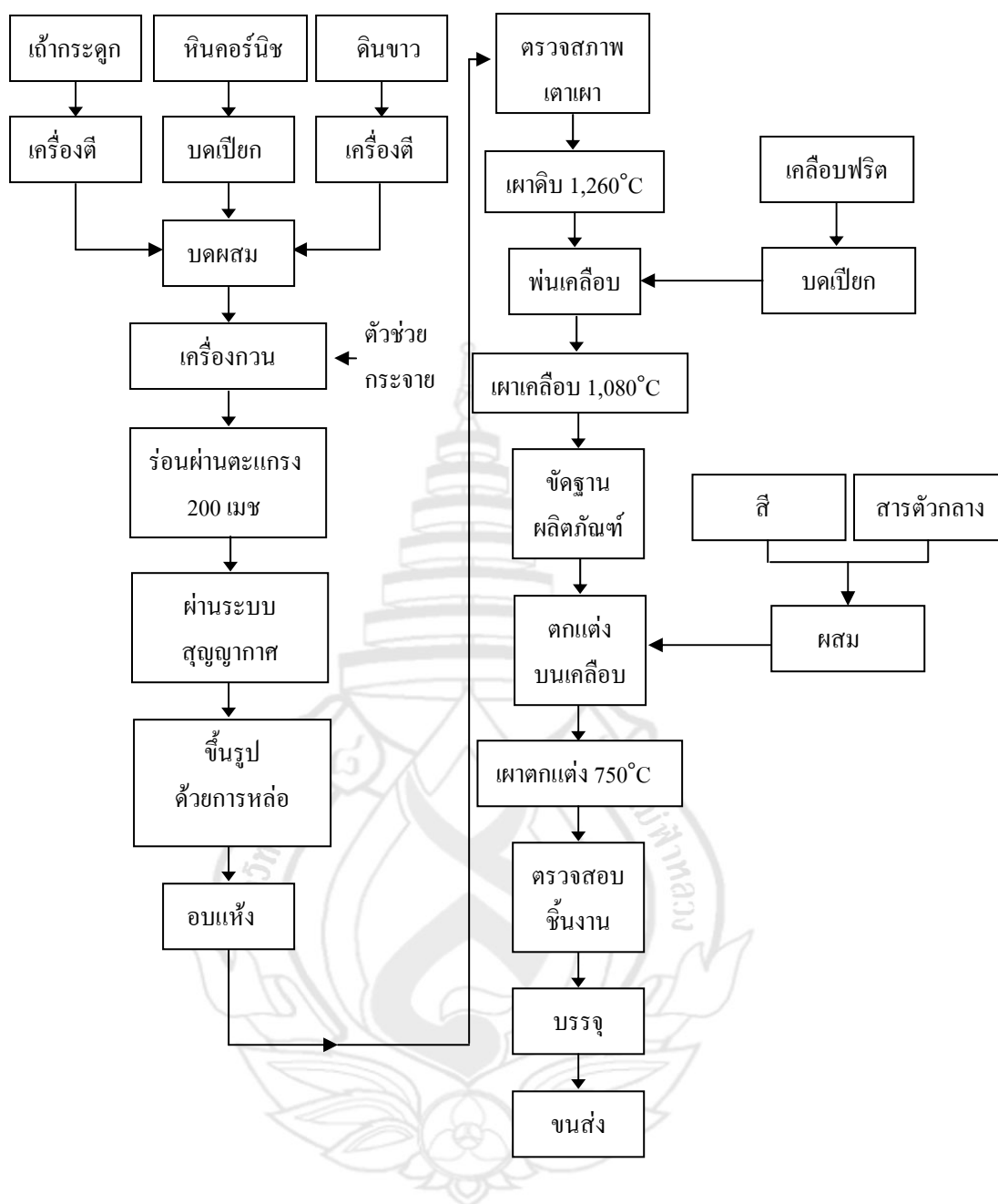
ก.ลักษณะของอนุภาคหลังการขึ้นรูป

ข.การรวมตัวกันของอนุภาคทำให้เกิดรูพรุนในช่วงเริ่มต้นการเผาซินเตอร์

ค.หลังการเผาซินเตอร์จะทำให้ขนาดและรูปร่างรูพรุนเปลี่ยนไป

2.4.3 การเคลือบ

เนื้อดินโบนไชน่าหลังการเผาดิบจะเหลือรูพรุนน้อยมาก การเคลือบผลิตภัณฑ์จึงต้องนำผลิตภัณฑ์ที่เผาดิบแล้วไปอบให้ร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 80 องศาเซลเซียส ก่อนนำมาชุบเคลือบเคลือบที่เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ควรเป็นเคลือบหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 1,050 – 1,100 องศาเซลเซียส (ไพจิตร อังศิริวัฒน์, 2541)



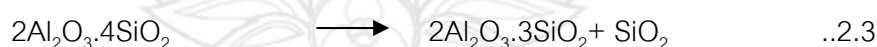
ภาพที่ 2.4 แผนผังแสดงขั้นตอนการผลิตโบนโซนา

2.5 ปฏิกริยาในการเผาเนื้อดินโบนไชน่า

การเกิดปฏิกริยาระหว่างการเผาเนื้อดินโบนไชน่า ซึ่งมีส่วนผสมของ เถ้ากระดูก ดินขาว และเฟลด์สปาร์ โดยที่อุณหภูมิของวัตถุดิบแต่ละชนิดมีขนาดเล็กกว่า 10 ไมครอน ในการเผาดินขาว แร่เคโอลินในดินจะเปลี่ยนโครงสร้างเป็นเมตะเคโอลิน ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เถ้ากระดูกจะสลายเป็นไตรแคลเซียมฟอสเฟต เริ่มที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส แคลเซียมออกไซด์จากการสลายของเถ้ากระดูกทำปฏิกริยากับเมตะเคโอลินกลายเป็นอะนอร์ไทต์ที่อุณหภูมิประมาณ 900 องศาเซลเซียส เฟลด์สปาร์เกิดการหลอมเหลว หลังการเผาที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส ขณะเดียวกัน อะนอร์ไทต์ซึ่งเป็นเฟสหลักในเนื้อดินที่มีความยาวประมาณ 100 นาโนเมตร หลังเผาที่อุณหภูมิ 1,300 องศาเซลเซียส ผลึกอะนอร์ไทต์โตขึ้นจนมีขนาด 30 ไมครอนมีลักษณะเป็นเข็มคล้ายมัลไลต์ และ ผลึกไตรแคลเซียมฟอสเฟตขนาดเล็ก 5-10 ไมครอน หลังเผาที่อุณหภูมิสูงกว่า 1,200 องศาเซลเซียส (Iqbal & Messer, 2000)

Roberts and Beech (1951, อ้างอิงใน Kara & Stevens, 2002b) ได้อธิบายกลไกการเกิดปฏิกริยาระหว่าง เถ้ากระดูก ($\text{Ca}(\text{OH})_2 \cdot 3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) และแร่เคโอลินไนต์ ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ว่ามี 2 กลไก ซึ่งสามารถอธิบายกลไกทั้ง 2 ได้ดังนี้

กลไกที่ 1



จากกลไกที่ 1 แคลเซียมออกไซด์ และ ฟอสฟอรัส เพนตะออกไซด์ ในเถ้ากระดูก จะรวมกันเป็นไตรแคลเซียม ฟอสเฟตดังสมการที่ 2.1 แคลเซียมออกไซด์ ที่เหลือในเถ้ากระดูก จะรวมกับเมตะเคโอลิน รวมกันเป็น อะนอร์ไทต์ ดังสมการที่ 2.2 เมตะเคโอลินส่วนที่เหลือจากการสร้างเป็นอะนอร์ไทต์ จะเปลี่ยนเป็นสปีเนลดังสมการที่ 2.3 และสปีเนลสลายตัวกลายเป็นมัลไลต์ทั้งหมดที่จะอยู่ในเฟสของแก้ว สมการในกลไกที่ 1 นี้เรียกว่า “The non phosphate glass equation”

กลไกที่ 2



ในกลไกที่ 2 แคลเซียมออกไซด์จากการสลายของเถ้ากระดูกจะรวมกับ เมตะเคโอไลน์ กลายเป็น อะนอร์ไทต์ ดังสมการที่ 2.5 แคลเซียมออกไซด์ส่วนที่เหลือในเถ้ากระดูก จะรวมกับ ฟอสฟอรัสเพนตะออกไซด์ในเถ้ากระดูก รวมกันเป็น ไตรแคลเซียมฟอสเฟต ดังสมการที่ 2.6 และ ฟอสฟอรัสเพนตะออกไซด์ส่วนที่เหลือในเถ้ากระดูกจะเกิดปฏิกิริยาเพื่อรวมกันเป็นแก้ว ดังสมการที่ 2.7 สมการในกลไกที่ 2 เรียกว่า “The phosphate glass equation”

จากงานวิจัยของ Kara and Stevens (2002a) ซึ่งศึกษาเกี่ยวกับลักษณะเฉพาะของเนื้อดิน โบนไชน่า โดยนำเนื้อดินโบนไชน่า ที่มีส่วนผสมของ ดินขาว 25 เปอร์เซ็นต์ เถ้ากระดูก 50 เปอร์เซ็นต์ และหินคอร์นิช 25 เปอร์เซ็นต์ นำไปทดสอบอุณหภูมิการเผา และวัดค่าความหนาแน่น และความพรุนตัวปรากฏ ผลการทดลองการเผาเนื้อดินโบนไชน่าพบว่าอุณหภูมิการเผาที่เหมาะสม คือ 1,245 องศาเซลเซียส ขึ้นไฟ 1 ชั่วโมง ขึ้นงานหลังเผามีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 2.58 ลูกบาศก์ ต่อตารางเซนติเมตร และค่าความพรุนตัวปรากฏน้อยกว่า 0.5 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นค่าดีที่สุด และเมื่อนำไปวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) พบว่า มีผลึกของไตรแคลเซียมฟอสเฟต อะนอร์ไทต์ และควอตซ์ ซึ่งจากการอ้างอิงของ Capoglu (2005) พบว่า ในเนื้อดินโบนไชน่าประกอบด้วยผลึกของไตรแคลเซียมฟอสเฟต 40 เปอร์เซ็นต์ อะนอร์ไทต์ 30 เปอร์เซ็นต์ และแก้ว 40 เปอร์เซ็นต์

2.6 คุณสมบัติของเนื้อดินโบนไชน่า

2.6.1 ความขาว

สีของวัตถุดิบเซรามิกเกิดจากธาตุในกลุ่มทรานซิชัน เช่น คอปเปอร์ โครเมียม เหล็ก ซึ่งธาตุหลักเป็นธาตุที่ไม่บริสุทธิ์และปะปนในสารเซรามิก สารใดที่มีธาตุหลักเป็นส่วนประกอบอยู่จะทำให้เกิดสี เช่น สีเหลือง สีเหลืองอ่อน สีแดง สีเทา สีน้ำตาล ขึ้นอยู่กับปริมาณและความเข้มข้น (Kingery, 1976)

วัตถุดิบทุกชนิดที่ใช้เตรียมเนื้อดินโบนไชน่าจะต้องมีความขาวบริสุทธิ์ภายหลังการเผา หากวัตถุดิบมีมลทินของเฟอร์ริกออกไซด์ ทิเทเนียมไดออกไซด์ เจือปนอยู่มากสีของเนื้อดินจะหมองคล้ำหลังการเผา ดังนั้นการเตรียมวัตถุดิบจะต้องเน้นที่ความบริสุทธิ์หรือความขาวของวัตถุดิบ (ไพจิตร อังศิริวัฒน์, 2541)

นอกจากการเลือกวัตถุดิบที่มีความบริสุทธิ์แล้ว สิ่งส่งผลต่อสีของเนื้อดินคือ บรรยากาศการเผา และอุณหภูมิการเผา บรรยากาศที่ใช้ในการเผาเซรามิก คือ บรรยากาศออกซิเดชัน และรีดักชัน ซึ่งจะมีปฏิกิริยาที่ส่งผลต่อสีของเนื้อดิน (Lawrence, 1972)

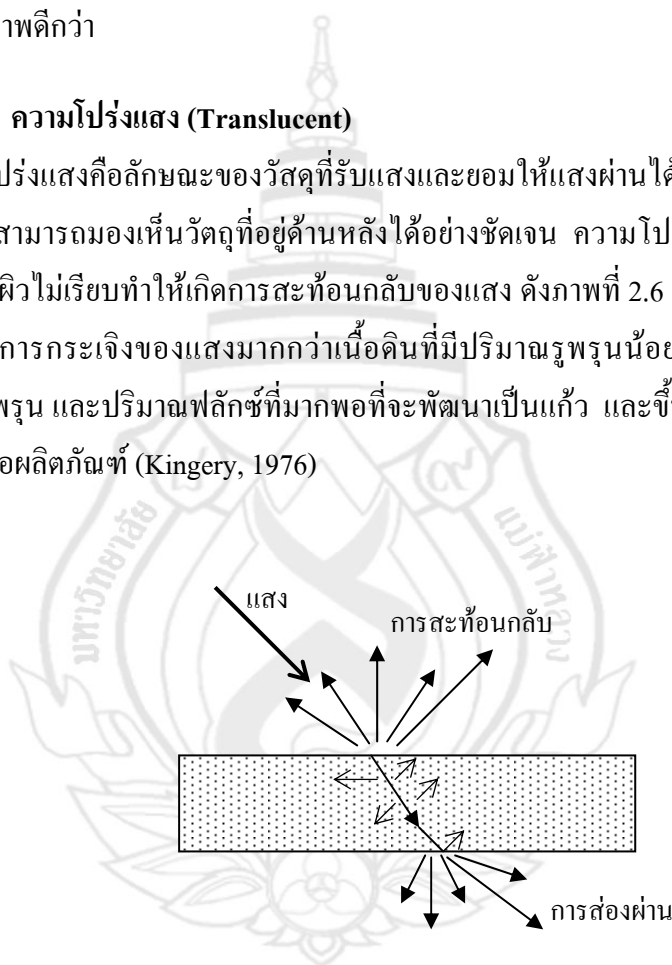
จากงานวิจัยของ กาญจนา อินทรชิต (2536) ได้ศึกษาประโยชน์จากหินผุลำปางในการผลิตเซรามิกชนิดพอร์ซเลน เพื่อทำการผลิตเซรามิกชนิดเนื้อละเอียดที่มีคุณภาพดีมีความขาว โดยใช้หินผุลำปางเป็นส่วนผสมหลัก 40 เปอร์เซ็นต์ และมีส่วนผสมของดินขาว 20 เปอร์เซ็นต์ เฟลด์สปาร์ 25 เปอร์เซ็นต์ และควอตซ์ 15 เปอร์เซ็นต์ การศึกษาวิจัยเป็นการคัดเลือกจากความขาวหลังเผาของหินผุลำปาง 5 แหล่ง มาเป็นตัวผสมในเนื้อดิน ซึ่งความขาวหลังเผาของหินผุลำปางหลังเผาซึ่งมีสิ่งปนเปื้อนน้อยที่สุด (เฟอร์ริกออกไซด์ = 0.42) เมื่อนำชิ้นงานไปเผาที่อุณหภูมิ 1,260 - 1,280 องศาเซลเซียส ผลการทดสอบหลังเผาพบว่าค่าสี มีค่า $L = 88.25$ ค่าการหดตัว 13.22 เปอร์เซ็นต์ ค่าการดูดซึมน้ำ 0.21 เปอร์เซ็นต์

จากงานวิจัยของ วรุณี ถิรมงคล (2531) ได้ทดลองอัตราส่วนผสมของวัตถุดิบที่ใช้ทำเนื้อดินเซรามิกโบนไชน่าประกอบด้วยถ้ำกระดุก 47 เปอร์เซ็นต์ ดินขาว จังหวัดนราธิวาส 25 เปอร์เซ็นต์ และหินฟันม้า 28 เปอร์เซ็นต์ โดยเติมเบนโทไนต์ 0.05 – 2.00 เปอร์เซ็นต์ เพื่อให้ขึ้นรูปได้สะดวกขึ้น แต่เบนโทไนต์ทำให้ค่าความขาวของเนื้อเซรามิกเท่ากับ 85.4

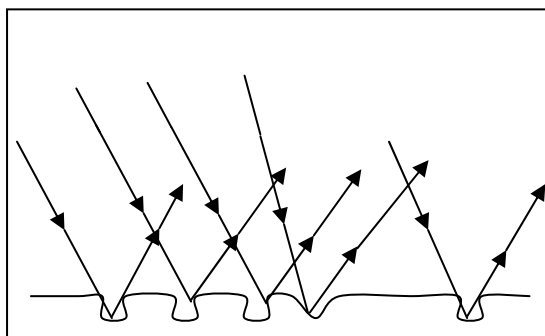
นอกจากนั้น วรณี ภิรมงคล (2531) ได้ทดลองทำเนื้อเซรามิกโบนไชน่า โดยใช้ไดแคลเซียม ฟอสเฟต (Dicalcium phosphate) แทนเถ้ากระดูก โดยอัตราส่วนผสมประกอบด้วย ไดแคลเซียม ฟอสเฟต 47 เปอร์เซ็นต์ ดินขาว 25 เปอร์เซ็นต์ หินฟินม้า 28 เปอร์เซ็นต์ และหินเขียวหนุมาน 5 เปอร์เซ็นต์ กระบวนการผลิตใช้วิธีเดียวกับเนื้อเซรามิกโบนไชน่าที่ใช้กระดูกเป็นส่วนผสม ผลการทดลองสามารถเปรียบเทียบสมบัติของเนื้อเซรามิกโบนไชน่า ที่ทำจากไดแคลเซียม ฟอสเฟต มีค่าความขาว 70.2 กับเนื้อเซรามิกที่เตรียมจากเถ้ากระดูก โดยพบว่า ผลิตภัณฑ์ที่ใช้เถ้ากระดูกเป็นส่วนผสมมีคุณภาพดีกว่า

2.6.2 ความโปร่งแสง (Translucent)

ความโปร่งแสงคือลักษณะของวัสดุที่รับแสงและยอมให้แสงผ่านได้บางส่วนแสดงดังภาพที่ 2.5 ทำให้ไม่สามารถมองเห็นวัตถุที่อยู่ด้านหลังได้อย่างชัดเจน ความโปร่งแสงขึ้นอยู่กับรูพรุน เพราะหากพื้นที่ผิวไม่เรียบทำให้เกิดการสะท้อนกลับของแสง ดังภาพที่ 2.6 วัสดุที่มีปริมาณรูพรุนสูงจะทำให้เกิดการกระเจิงของแสงมากกว่าเนื้อดินที่มีปริมาณรูพรุนน้อย อุณหภูมิการเผาที่สูงสามารถกำจัดรูพรุน และปริมาณฟลักซ์ที่มากพอที่จะพัฒนาเป็นแก้ว และขึ้นอยู่กับดัชนีหักเหของผลึกที่มีอยู่ในเนื้อผลิตภัณฑ์ (Kingery, 1976)



ภาพที่ 2.5 ลักษณะการสะท้อนกลับและการส่องผ่านของวัสดุโปร่งแสง



ภาพที่ 2.6 ภาพการสะท้อนกลับของแสงเมื่อวัตถุมีพื้นผิวไม่เรียบ

จากงานวิจัยของ Capoglu and Messer (2002) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการออกแบบและการพัฒนาความโปร่งแสงในผลิตภัณฑ์ไวท์แวร์ โดยใช้ Chamotte (วัตถุดิบสังเคราะห์) เนื่องจาก Chamotte ประกอบด้วย ไคล์สโตน (CaCO_3) ควอตซ์ (SiO_2) และอลูมิเนียม ไฮดรอกไซด์ ($\text{Al}(\text{OH})_3$) จึงเป็นแหล่งของอะนอร์ไทต์ ซึ่งความโปร่งแสง เกิดจากผลึกของอะนอร์ไทต์ เพราะผลึกของอะนอร์ไทต์ มีค่าการหักเหของแสงใกล้เคียงกับแก้ว ซึ่งอะนอร์ไทต์มีค่าการหักเหของแสงเท่ากับ 1.58 ในขณะที่แก้วมีค่าการหักเหของแสงประมาณ 1.5 การทดลองนี้จึงต้องการให้มีผลึกของอะนอร์ไทต์เป็นเฟสหลัก โดยการทดลองจะใช้ ขนาดอนุภาคของ Chamotte ขนาดเล็ก ประมาณ 1.5 ไมครอน 38 เปอร์เซ็นต์ และขนาดกลาง ประมาณ 10 ไมครอน 50 เปอร์เซ็นต์ และดินขาว 12 เปอร์เซ็นต์ เพื่อการรวมกันได้ดีของอนุภาค หลังการเผาที่อุณหภูมิ 1,350 องศาเซลเซียส ยืนไฟ 3 ชั่วโมง ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) พบว่า เฟสหลักเป็นอะนอร์ไทต์ ประมาณ 76 เปอร์เซ็นต์ มีเฟสของมัลไลต์ ประมาณ 8 เปอร์เซ็นต์ และแก้ว 16 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งงานที่ได้มีความหนาแน่นสูง ความพรุนตัวต่ำจึงช่วยเพิ่มความโปร่งแสง

จากงานวิจัยของ Kara and Steven (2002) ได้ศึกษาลักษณะเฉพาะทางโครงสร้างทางจุลภาคของเนื้อดินโบนไชน่า โดยใช้สูตรมาตรฐานของอังกฤษ เผาที่อุณหภูมิ 1,245 องศาเซลเซียส ตรวจสอบโครงสร้างโดยเทคนิค TEM (Transmission electron microscopy) ผลการทดลองพบว่า นอกจากมีผลึกของไตรแคลเซียมฟอสเฟต และอะนอร์ไทต์ ที่กระจายอยู่ในเนื้อแก้ว ยังพบ APS (Amorphous phase separation) ซึ่งมีลักษณะเป็นเม็ดกลมขนาด 50 นาโนเมตร กระจายอยู่ในเฟตแก้ว ซึ่ง APS นี้ประกอบด้วยฟอสฟอรัส เพนตะออกไซด์ และฟอสเฟต อยู่ภายใน และ APS นี้จะช่วยส่งเสริมความโปร่งแสงของเนื้อดินโบนไชน่าคือ ขนาดของอนุภาคของ APS ที่ใหญ่จะสะท้อนกลับของแสงน้อยกว่าขนาดอนุภาค APS ที่เล็ก

และจากงานวิจัยของ Kamseu et al., (2007) ได้ศึกษาลักษณะเฉพาะของการใช้ดินขาวจาก 2 แหล่งในคาเมอรูนเป็นส่วนผสมในเนื้อดินพอร์ซเลน ซึ่งเป็นดินขาวจาก Mayouom และ Ntamuka โดยนำดินขาวทั้ง 2 แหล่งผสมกับ ควอตซ์ เนฟาลีน และโพแทสเซียม เฟลด์สปาร์ โดยอัตราส่วน การผสมเป็นสูตรเซเกอร์ของพอร์ซเลน แบ่งการทดสอบเป็นพอร์ซเลน 2 ชนิดคือ ซอฟพอร์ซเลน และฮาร์ดพอร์ซเลน หลังจากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิ 1,200-1,300 องศาเซลเซียส และ 1,300 -1,400 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ผลการทดลองหลังการเผา พบว่าส่วนซอฟพอร์ซเลนหลังการเผาที่ อุณหภูมิ 1,250 องศาเซลเซียส มีค่าความหนาแน่น 2.58 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร การดูดซึมน้ำ 0.15 เปอร์เซ็นต์ ความพรุนตัว 5.3 เปอร์เซ็นต์ ฮาร์ดพอร์ซเลนหลังเผาที่อุณหภูมิ 1,350 องศา เซลเซียส มีความหนาแน่น 2.59 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ความพรุนตัว 4 เปอร์เซ็นต์ และการดูด ซึมน้ำ 0.05 เปอร์เซ็นต์ ผลการทดลองยังพบว่าความโปร่งแสงของเนื้อดินทั้ง 2 ชนิดดีขึ้นเมื่อเพิ่ม อุณหภูมิการเผาเนื่องจากจะมีเฟตแก้วเกิดขึ้นทำให้เกิดปรากฏการณ์เคลือบด้วยตัวของเนื้อดินเอง (self glazing)

นอกจากนั้นความโปร่งแสง ของเนื้อดินยังขึ้นอยู่กับความหนาของผลิตภัณฑ์ ถ้าบางจะมีความ โปร่งแสงเพิ่มขึ้น ความโปร่งแสงจะมีมากขึ้นถ้าเพิ่มสัดส่วนของเถ้ากระดูก และ หินฟินม้า ขณะที่ปริมาณของดินขาวลดลงหรือคงที่ การเติมดินดำในเนื้อดินโบนาไชน่าปริมาณเพิ่มขึ้น จะทำให้ ความโปร่งแสงลดลง ความละเอียดของเนื้อดินต้องมีขนาด 1 ไมครอน แต่ความละเอียดของตัว หลอมละลาย และตัวทนไฟ ต้องเล็กกว่า 10 ไมครอน (ไพจิตร อังศิริวัฒน์, 2541)

2.6.3 ความแข็งแรง (Strength)

ความแข็งแรง คือ ความทนทานของวัสดุเมื่อได้รับแรงกระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ซึ่งถูก กระทำด้วยแรงอัตราคงที่หนึ่งๆ ที่วัสดุสามารถทนได้ก่อนการแตกหักเสียหาย ความแข็งแรงเชิงกล ของวัสดุใดๆขึ้นอยู่กับวัสดุนั้นเมื่อถูกแรงกระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่หรือความเค้น (Stress) โดยแรง กระทำมีลักษณะแตกต่างกันได้แก่ แรงดึง (Tension) แรงกด (Compressive) แรงหัก (Bending) แรง กระแทก (Impact) แรงบิด (Torsion) และแรงเฉือน (Shear) เมื่อวัสดุได้รับแรงกระทำจะก่อให้เกิด การเปลี่ยนแปลงในเนื้อวัตถุ อัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงระหว่างความยาวที่เปลี่ยนแปลงไป (ΔL) ต่อความยาวเดิม (L_0) เรียกว่า ความเครียด (Strain) โดยความแข็งแรงเชิงกลซึ่งเป็นความสัมพันธ์ ระหว่าง Stress/Strain จะมีค่าสูงก็ต่อเมื่อแรงกระทำมีค่ามาก แต่การเปลี่ยนแปลงความเครียดนั้นมี ค่าน้อย (Singer, 1963)

แม่น อมรสิทธิ์ และ สมชัย อัครทิวา (2544) อธิบายปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อความแข็งแรงของเซรามิก ได้แก่ ความบกพร่องหรือความผิดปกติในโครงสร้าง (Structural defects) อาทิเช่น รอยแตกอาจเกิดขึ้นเนื่องจากการแตงผิว รูพรุน (Porosity) เกรนที่มีขนาดใหญ่ เป็นต้น ความบกพร่องเหล่านี้จะมีผลทำให้ความแข็งแรงของวัสดุเซรามิกลดลงกล่าวคือ เมื่อมีรูพรุน หรือ รอยแตกร้าวเกิดขึ้นที่บริเวณนั้นจะมีความเค้นสะสมเกิดขึ้นมากทำให้วัสดุถูกทำลายได้ง่าย แต่ถ้าวัสดุนั้นไม่มีรูพรุน รอยแตกร้าว ความแข็งแรงของวัสดุจะขึ้นกับขนาดของเกรน วัสดุที่มีเกรนมีขนาดเล็ก จะมีความแข็งแรงมากกว่าวัสดุที่มีเกรนขนาดใหญ่ และขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมี โครงสร้างและสภาพพื้นผิว

จากงานวิจัยของ Maity and Sarkar (1996) ได้พัฒนาเนื้อผลิตภัณฑ์ไวท์แวร์ให้มีความแข็งแรงสูงโดยศึกษาผลกระทบของ Sillimanite sand ในการเข้ามาแทนที่ควอตซ์และอะลูมินา/คอร์เดียไรต์ (Cordierite) แทนเฟลด์สปาร์หรือแร่ฟันม้า (Feldspar) นำมาผสมกับดินขาว ในอัตราส่วนดินขาว 50 เปอร์เซ็นต์ Sillimanite sand 25 เปอร์เซ็นต์ คอร์เดียไรต์ (Cordierite) 5 เปอร์เซ็นต์ และอะลูมินา 20 เปอร์เซ็นต์ ได้นำมาศึกษาพบว่ามีความผันแปรของส่วนประกอบเนื่องจากอะลูมินาได้รวมตัวกันที่ละน้อยจนเข้ามาแทนที่คอร์เดียไรต์ การที่คอร์เดียไรต์ถูกแทนที่โดยอะลูมินา 20 เปอร์เซ็นต์ หลังการเผาที่อุณหภูมิ 1,500 องศาเซลเซียส ทำให้ค่าความแข็งแรงดัด (Flexural strength) เพิ่มขึ้น 100 เปอร์เซ็นต์ คิดเป็น 195 เมกะปาสกาล เนื่องจากอะลูมินามากขึ้นทำให้อุณหภูมิการเผาสูงขึ้นเฟสแก้วลดลง นอกจากนั้นความแข็งแรงยังมีความสัมพันธ์กับความหนาแน่นซึ่งเป็นความหนาแน่นสัมพัทธ์ (Relative density) ซึ่งจากผลการทดลองในอัตราส่วนดังกล่าวมาแล้วพบว่าค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ อยู่ระหว่าง 91 -92 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งความหนาแน่นสัมพัทธ์ มีความสัมพันธ์กับความแข็งแรงมากกว่าความหนาแน่นรวม (Bulk density) นอกจากนั้นในขั้นทดสอบพบว่า มีมัลไลต์เป็นตัวช่วยเพิ่มความแข็งแรง

2.6.4 ความต้านทานการแตกร้าว (Fracture toughness)

เซรามิกเป็นพันธะแบบไอออนิก-โคเวเลนต์ ดังนั้นวัสดุเซรามิกหลายชนิดจึงมักจะแข็งและมีค่าความต้านทานการแตกร้าวที่ต่ำ (แม่น อมรสิทธิ์ และ สมชัย อัครทิวา, 2544) ความต้านทานการแตกร้าว (Fracture toughness) เป็นค่าความต้านทานการแตกหักของชิ้นงาน หลังจากได้รับแรงกระทำโดยชิ้นงานนั้นๆ จะต้องผ่านการทำ Precrack มาก่อน โดยเทคนิคที่ใช้สำหรับการตรวจวัด ความต้านทานการแตกร้าว (Fracture toughness) มีหลายวิธี เช่น Indentation Crack Length/Fracture , Indentation Strength (ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ [mtec], 2552)

ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความต้านทานการแตกร้าวคือ การเพิ่มอัตราส่วนระหว่างผลึกต่อแก้ว การเพิ่มขนาดของผลึก และการมีเฟสที่ 2 จากการรายงานผลงานวิจัยเกี่ยวกับอลูมินา คริสโตบาไลต์ และมัลไลต์ในผลิตภัณฑ์ไวต์แวร์ นอกจากนั้นค่าความต้านทานการแตกร้าวยังขึ้นอยู่กับขนาดรูพรุน ปริมาตรรูพรุน ความหนาแน่นในผลิตภัณฑ์ (Ustundag, Tur & Capoglu, 2006)

จากงานวิจัยของ Ustundag et al. (2006) ได้ศึกษาพฤติกรรมทางกายภาพของไวท์แวร์ที่มีปริมาณดินผสมอยู่น้อย ซึ่งมีส่วนผสมคือ ดินขาว 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ดินดำ 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และ Prefire material 88 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยมี CaCO_3 , Al(OH)_3 , MgCO_3 เป็นส่วนผสม (ละเอียดและหยาบ) ทดสอบโดยวิธีเตรียมน้ำสลิปที่มีปริมาณของแข็งและขนาดอนุภาคของวัตถุดิบ แตกต่างกัน โดยกำหนด ปริมาณของแข็ง (40 , 42.5 , 45 , 47.5 , 50 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) เพื่อศึกษาค่าความแข็งแรง ความต้านทานการแตกร้าวและความหนาแน่น ผลหลังจากการเผาที่อุณหภูมิ 1,350 องศาเซลเซียส พบว่าค่าความแข็งแรง ความต้านทานการแตกร้าว และความหนาแน่นเพิ่มขึ้นสูงสุดที่มีปริมาณของแข็ง 45 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และค่าทั้ง 3 ลดลงเมื่อมีปริมาณของแข็ง 47.5 , 50 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ความหนาแน่นของน้ำสลิปที่มีปริมาณของแข็ง 45 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ภายหลังจากเผา มีค่าความหนาแน่น 2.52 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มีค่าความแข็งแรง 135 เมกะปาสคาล ความต้านทานการแตกร้าวมีค่าประมาณ 1.85 เมกะปาสคาล ดังนั้นทั้งความแข็งแรงและความต้านทานการแตกร้าวขึ้นอยู่กับความพรุนตัวของวัสดุ คือ ความพรุนตัวลดลงความแข็งแรงและความต้านทานการแตกร้าวจะเพิ่มขึ้น สำหรับการเพิ่มความแข็งแรงสามารถทำได้โดยการเพิ่มความต้านทานการแตกร้าวแต่สิ่งที่สำคัญกว่าคือการลดขนาดของตำหนิด้วยการลดความพรุนตัว ซึ่งผลการวิจัยนี้มีค่าความแข็งแรงมากกว่าความแข็งแรงของเนื้อดินโบนไชน่า และค่าความต้านทานการแตกร้าวมีค่าใกล้เคียงกับผลงานการวิจัยของ Batista, Messer, and Hand (2001) ซึ่งศึกษาเกี่ยวกับผลิตภัณฑ์โบนไชน่า และฟอร์ชเลนซึ่งมีค่าความแข็งแรง 100 เมกะปาสคาล และค่าความต้านทานการแตกร้าวประมาณ 2 เมกะปาสคาล

นอกจากนี้ยังมีสมบัติอื่นๆ ทางกายภาพเบื้องต้นของเนื้อดินโบนไชน่า คือความพรุนตัว ความหนาแน่น ความพรุนตัวปรากฏ

ตาราง 2.3 สมบัติทางกายภาพของเนื้อดินโบนไชน่า ที่ใช้สูตรมาตรฐาน (ถ้ากระดูก 50% , หินคอร์นิช 25% , ดินขาว 25%)ในการการผลิตเนื้อดินโบนไชน่า (Kara & Stevens, 2002a)

คุณสมบัติ		โบนไชน่า
ความหนาแน่น	(g/cm ³)	2.58
ความพรุนตัวปรากฏ	(%)	≤ 0.5
ความพรุนตัวจริง	(%)	10
ความหนาแน่นจริง	(g/cm ³)	2.82
ความหนาแน่นสัมพัทธ์	(%)	91.5
*ความแข็งแรง	(MPa)	98.5-140
**ความต้านทานการแตกร้าว	(MPa.m ^{1/2})	1-2

*ความแข็งแรงของเนื้อดินโบนไชน่า (ไพจิตร อังศิริวัฒน์, 2541)

**ความต้านทานการแตกร้าวในผลิตภัณฑ์ไวท์แวร์ (Henkes, Onoda & Carty, 1996)

งานวิจัยนี้ผู้วิจัยสนใจการผลิตเนื้อดินโบนไชน่าโดยการใช้หินผุ ซึ่งมีแร่กลุ่มไมก้า เคโอลิไนต์ เฟลด์สปาร์ และ ควอตซ์ ผสมอยู่เป็นแร่องค์ประกอบ จึงค่าน่าจะนำมาใช้แทนเฟลด์สปาร์ และหินคอร์นิชในเนื้อดินโบนไชน่า เนื่องจากลักษณะเด่นของเนื้อดินโบนไชน่า คือ ความโปร่งแสง สี และความแข็งแรง จากการทบทวนเอกสารพบว่า การทำให้เนื้อดินมีความโปร่งแสงต้องคำนึงคุณสมบัติของวัตถุดิบและกระบวนการผลิต ซึ่งจะมีผลสอดคล้องกับคุณสมบัติด้านความแข็งแรงของเนื้อดิน และ ความโปร่งแสงต้องศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของเนื้อดินด้วย สำหรับสีของเนื้อดินโบนไชน่า วัตถุดิบแต่ละตัวจึงต้องมีความบริสุทธิ์ ดังนั้นหินผุซึ่งนำมาเป็นตัวหลอมละลายในเนื้อดินโบนไชน่า น่าจะเป็นวัตถุดิบที่มีคุณสมบัติที่ดีพอสำหรับเนื้อดินโบนไชน่า

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

การดำเนินงานวิจัยแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอนได้แก่

ตอนที่ 1 การวิเคราะห์และการเตรียมวัตถุดิบซึ่งได้แก่ หินผุ และดินขาวจากแหล่งต่างๆ

ตอนที่ 2 การวิเคราะห์ทดสอบเพื่อเลือกเนื้อดินจากส่วนผสมที่แตกต่างกัน

ตอนที่ 3 การทดสอบเพื่อหาอุณหภูมิที่เหมาะสมกับเนื้อดินและศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับ ความขาว ความโปร่งแสง และสมบัติเชิงกลของเนื้อดินที่ถูกเลือกจากการวิจัยตอนที่ 2

ตอนที่ 4 การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ด้วยวิธีการหล่อ

เพื่อให้การดำเนินงานวิจัยบรรลุตามวัตถุประสงค์ ผู้วิจัยจึงกำหนดรายละเอียดของงานวิจัยไว้ดังนี้

3.1 วิธีดำเนินงานวิจัยตอนที่ 1

การเตรียมและการวิเคราะห์วัตถุดิบซึ่งได้แก่ หินผุ และดินขาวจากแหล่งต่างๆ ซึ่งมีวิธีการวิเคราะห์ทดสอบดังนี้

3.1.1 การเตรียมวัตถุดิบ

การเตรียมวัตถุดิบในการทดลองนี้ใช้หินผุจากบริษัท ภัทรรัตน์เคลย์แอนด์มินเนอรัล จำกัดเกรด A และบริษัท ที ไอ ซี ซึ่งหินผุของทั้ง 2 บริษัทเป็นหินผุจากจังหวัดลำปาง ดังนั้นจึงต้องผ่านการบดเพื่อลดขนาดอนุภาคโดยเตรียมหินผุ 300 กรัมและน้ำ 300 มิลลิลิตร บดด้วยหม้อบดพอร์ซเลน ด้วยเครื่องบดความเร็วสูง (High speed mill) และร่อนผ่านตะแกรงขนาด 325 เมช สำหรับดินขาวจะนำจาก 3 แหล่งคือ ดินขาวนราธิวาส ดินขาวลำปาง และดินขาวระนอง นำไปร่อนผ่านตะแกรงขนาด 325 เมช

3.1.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-Ray Fluorescence, XRF : Horiba รุ่น Mesa-500w) เตรียมตัวอย่างวัตถุดิบโดยการนำหินผุที่ผ่านการบดและร่อนผ่านตะแกรง 325 เมช ดินขาวร่อนผ่านตะแกรง 325 เมชเช่นกัน นำวัตถุดิบอัดขึ้นรูปโดยใช้แบบพิมพ์ทรงกระบอกทำจากเหล็กกล้าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร ด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิกแบบให้แรงอัดด้านเดียวชนิดคั่นโยกมือ นำวัตถุดิบจำนวน 3 กรัม เกลบในแบบพิมพ์ ใช้กำลังอัด 100 เมกะปาสกาล อัดค้างไว้ 30 วินาที จากนั้นนำชิ้นตัวอย่างไปทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ในขั้นตอนนี้ผู้วิจัยต้องการเปรียบเทียบปริมาณธาตุที่ให้สีซึ่งวัตถุดิบที่เลือกมาใช้นั้นจะมีผลต่อความขาวของเนื้อดิน

3.1.3 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก

การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffractometry, XRD บริษัท PANalytical รุ่น X' Pert PRO MPD ประเทศเนเธอร์แลนด์) เตรียมตัวอย่างโดยนำวัตถุดิบที่ร่อนผ่านตะแกรง 325 เมช บรรจุลงในที่ใส่ตัวอย่างทดสอบ (Holder Ring) โดยนำผงวัตถุดิบมาอัดลงในที่เตรียมตัวอย่างชนิดวิเคราะห์ผงใช้ใบมีดเกลี่ยผิวหน้าตัวอย่างเพื่อให้ผิวหน้าตัวอย่างเรียบ ก่อนนำเข้าเครื่องวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) แล้วทำการวิเคราะห์ในช่วงมุม 2 Theta เท่ากับ 5-80 องศา ความละเอียดของการเพิ่มมุม (Step size) คือ 0.0167 องศา

3.1.4 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อน

นำวัตถุดิบที่ร่อนผ่านตะแกรง 325 เมช วิเคราะห์การสลายตัวเชิงความร้อนด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริกอะนาไลซิส (Thermogravimetric Analysis ;TGA) ร่วมกับการศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางความร้อน ณ ช่วงอุณหภูมิต่างๆขณะทำการเผาโดยใช้เทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลเทอร์โมลอะนาไลซิส (Simultaneous Differential Thermal Analysis ; SDTA) ของบริษัท Mettler Toledo รุ่น TGA/SDTA 851° โดยให้ความร้อนจากอุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราความร้อน 20 องศาเซลเซียสต่อนาที ในอากาศสังเคราะห์ (Synthetic Air)

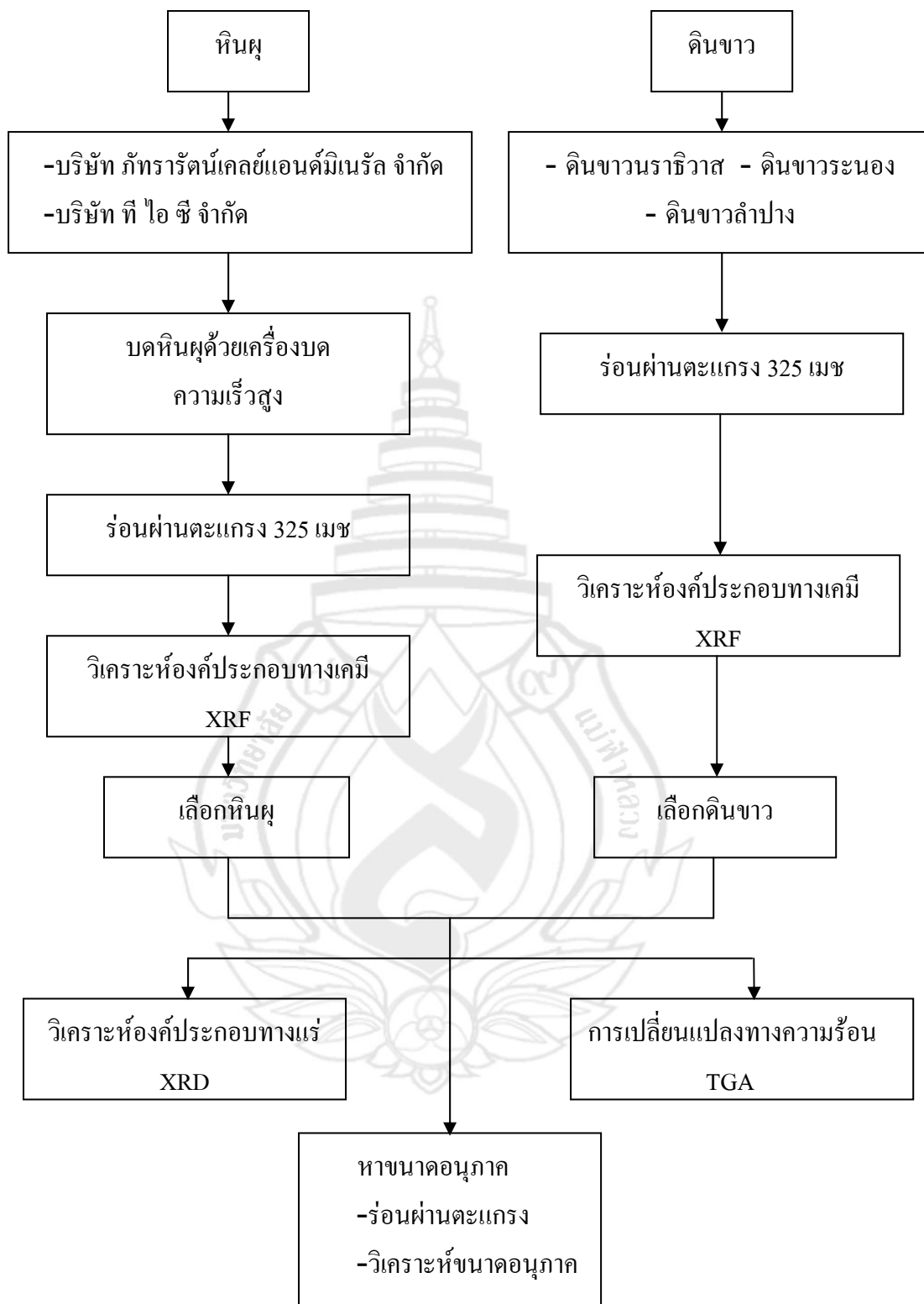
3.1.5 การหาขนาดอนุภาค

3.1.5.1 วิธีการร่อนผ่านตะแกรง เตรียมโดยการนำหินผุที่ผ่านการบดมาอบแห้ง หลังจากนั้นหินผุ 100 กรัม แช่น้ำ 300 มิลลิลิตร เป็นเวลา 24 ชั่วโมงก่อนที่จะนำไปร่อนผ่านตะแกรง ขนาด 60, 120, 200 และ 325 เมช หลังจากนั้นนำกากค้างตะแกรงของแต่ละขนาดไปอบที่

อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และนำมาชั่งน้ำหนักก็จะได้ปริมาณของกากค้ำง
ตะแกรง ส่วนดินขาวทำเช่นเดียวกันแต่ไม่ต้องผ่านขั้นตอนการบด

3.1.5.2 วิเคราะห์หาการกระจายตัวของขนาดอนุภาคด้วยเครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาค
(Partisizer: Malvern รุ่น Mastersizer 2000+Hydro 2000 MU) นำวัตถุดิบที่ร่อนผ่าน 325 เมช
จำนวน 1 กรัม ผสมกับน้ำที่ปราศจากไอออน ปริมาณ 20 มิลลิลิตร คนให้เข้ากัน ก่อนจะเข้าสู่
ขั้นตอนการวิเคราะห์ขนาดอนุภาค โดยการหยดลงในช่องตัวอย่างที่มีใบพัดช่วยในการกระจายตัว
ของสารจนได้สัญญาณตามที่กำหนด จากนั้นทำการวิเคราะห์ค่าการกระจายตัวของขนาดอนุภาค
และบันทึกค่าเฉลี่ยของขนาดอนุภาคแต่ละตัวอย่าง





ภาพที่ 3.1 แผนผังการวิจัยขั้นตอนที่ 1

3.2 วิธีดำเนินงานวิจัยตอนที่ 2

การวิเคราะห์ทดสอบเพื่อเลือกเนื้อดินจากส่วนผสมที่แตกต่างกัน ซึ่งแสดงในตารางที่ 3.1 นำขึ้นทดสอบของเนื้อดินทั้ง 2 สูตร เผาอบพริกที่อุณหภูมิ 800 – 1,250 องศาเซลเซียส และมีขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3.1 แสดงอัตราส่วนผสมโดยน้ำหนักของวัตถุดิบ

วัตถุดิบ	อัตราส่วนโดยน้ำหนัก	
	สูตรที่ 1	สูตรที่ 2
เถ้ากระดูก	50	50
ดินขาว	25	25
หินผุ	25	25
เติมโพแทสเซียมเฟลด์สปาร์	-	10
รวม	100	110

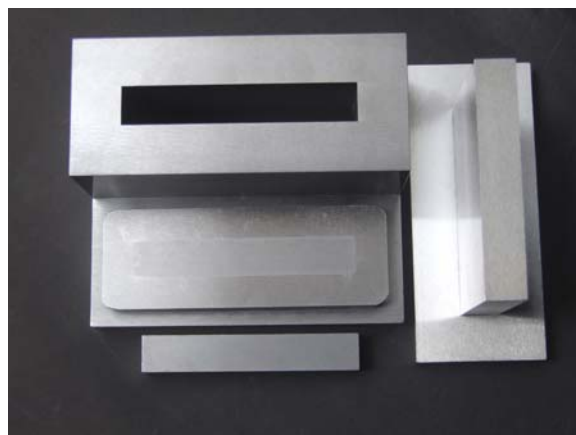
3.2.1 การบดผสม

การศึกษาสมบัติต่างๆ ของชิ้นงานหลังการขึ้นรูป สามารถเตรียมชิ้นงานโดยการนำ เถ้ากระดูก ดินขาว หินผุ และโพแทสเซียมเฟลด์สปาร์ มาผสมกันตามตารางที่ 3.1 บดผสมเปี๊ยกด้วยหม้อบดพอร์ซเลนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำไปอบแห้ง 110 องศาเซลเซียส นำสารผสมแห้งมาร่อนผ่านตะแกรงขนาด 200 เมช เพื่อให้อนุภาคสารผสมที่เกาะตัวกันหลังการอบแห้งกระจายตัวออกจากกัน เพราะการเกาะกันของผงสารผสมจะมีผลทำให้การแน่นตัวในชิ้นงานหลังการขึ้นรูปไม่สม่ำเสมอ

3.2.2 การอัดขึ้นรูปชิ้นงาน

นำสารผสมที่ผ่านการอบและร่อนไปอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดระบบไฮโดรลิคชนิดแรงอัดด้านเดียว โดยการอัดขึ้นด้วยแบบพิมพ์เหล็กกล้ำรูปทรงแท่งสี่เหลี่ยมขนาดยาว 7 เซนติเมตร กว้าง

1.2 เซนติเมตร ดังรูปที่ 3.2 โดยชั่งสาร 8 กรัมต่อ 1 ชิ้นงาน ใช้กำลังอัด 100 MPa อัดค้างไว้ 30 วินาที เป็นจำนวน 5 ชิ้นต่อ 1 ตัวอย่าง



ภาพที่ 3.2 แบบพิมพ์เหล็กกล้า

3.2.3 การเผาอบผนิก

การเผาอบผนิกเป็นขั้นตอนหนึ่งในกระบวนการผลิตเซรามิก ทำให้รูพรุนภายในชิ้นงานลดลง และมีความแข็งแรงมากขึ้น โดยการเผาอบผนิกจะต้องมีการศึกษาผลการเพิ่มอุณหภูมิสำหรับงานวิจัยขั้นตอนนี้เลือกศึกษาอุณหภูมิการเผาอบผนิกที่ 800 – 1,250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ซึ่งเตาที่ใช้ในขั้นตอนการเผาอบผนิกเป็นเตาไฟฟ้าที่สามารถทนอุณหภูมิสูง 1,500 องศาเซลเซียส

3.2.4 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของชิ้นงานหลังการเผาอบผนิก

3.2.4.1 การทดสอบค่าการหดตัว (Shrinkage)

การทดสอบการหดตัว เริ่มจากการเตรียมเนื้อดินเพื่อทดสอบการหดตัวจะเตรียมโดยการนำเนื้อดินไปขึ้นรูปด้วยวิธีการอัด หลังจากนั้นวัดความยาวตามแนวเส้นตรงของชิ้นตัวอย่างก่อนเผา นำชิ้นตัวอย่างไปเผาที่อุณหภูมิ 800 – 1,250 องศาเซลเซียส และวัดค่าการหดตัวหลังเผา โดยคำนวณหาค่าการหดตัวเป็นร้อยละ ตามสูตรที่ 3.1

$$S_t = \frac{L_p - L_f}{L_p} \times 100 \quad ..3.1$$

โดยที่ S_t คือ ร้อยละของการหดตัวหลังเผา
 L_p คือ ความยาวของชิ้นตัวอย่างก่อนเผา
 L_f คือ ความยาวของชิ้นตัวอย่างหลังเผา

3.2.4.2 การทดสอบความพรุนตัวปรากฏ (Apparent porosity)

การทดสอบความพรุนตัวปรากฏ (Apparent porosity) ของแท่งทดสอบหลังเผาที่อุณหภูมิ 800 – 1,250 องศาเซลเซียส วิธีการคือนำตัวอย่างหลังจากเผามาต้มในน้ำเป็นเวลา 5 ชั่วโมง แช่ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำตัวอย่างไปชั่งน้ำหนักในน้ำ และบันทึกค่าน้ำหนักในน้ำ (M_s) หลังจากนั้น นำชิ้นตัวอย่างซับด้วยผ้าหมาดเพื่อไล่น้ำที่ผิวตัวอย่างออกนำไปชั่งน้ำหนักและบันทึกค่าน้ำหนักขึ้น (M_w) หลังจากนั้นนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และนำมาชั่งน้ำหนักบันทึกค่าน้ำหนักแห้ง (M_D) โดยใช้สูตรในการคำนวณค่าความพรุนตัวภายนอก ดังสมการที่ 3.2

$$\text{ความพรุนตัวปรากฏ (Apparent porosity)} = \frac{M_w - M_D}{M_w - M_s} \times 100 \quad ..3.2$$

โดยที่ M_D คือ น้ำหนักแห้ง
 M_w คือ น้ำหนักขึ้น
 M_s คือ น้ำหนักในน้ำ

3.2.4.3 การทดสอบการดูดซึมน้ำ (Water absorption)

การทดสอบการดูดซึมน้ำหลังเผาที่อุณหภูมิ 800 – 1,250 องศาเซลเซียส มีวิธีการทดสอบเช่นเดียวกับการวัดความพรุนตัวภายนอก และใช้ค่าของน้ำหนักเปียกกับน้ำหนักแห้งในการคำนวณ ซึ่งใช้สูตรคำนวณการดูดซึมน้ำดังสมการที่ 3.3

$$\text{การดูดซึมน้ำ (Water absorption)} = \frac{M_w - M_D}{M_D} \times 100 \quad ..3.3$$

โดยที่ M_D คือ น้ำหนักแห้ง
 M_w คือ น้ำหนักขึ้น

3.2.4.4 การทดสอบความหนาแน่น (Bulk density)

การทดสอบความหนาแน่นหลังเผาที่อุณหภูมิ 800 – 1,250 องศาเซลเซียส จะวัดหาความหนาแน่นมวล (Bulk density) ของแท่งทดสอบ มีวิธีการทดสอบเช่นเดียวกับการวัดความพรุนด้วยภายนอก ใช้ค่าน้ำหนักในน้ำ น้ำหนักขึ้น และน้ำหนักแห้งในการคำนวณโดยใช้สูตรคำนวณความหนาแน่นดังสมการที่ 3.4

$$\text{ความหนาแน่น (Bulk density)} = \frac{M_D}{M_W - M_S} \quad \text{..3.4}$$

โดยที่ M_D คือ น้ำหนักแห้ง

M_W คือ น้ำหนักขึ้น

M_S คือ น้ำหนักในน้ำ

3.2.5 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก

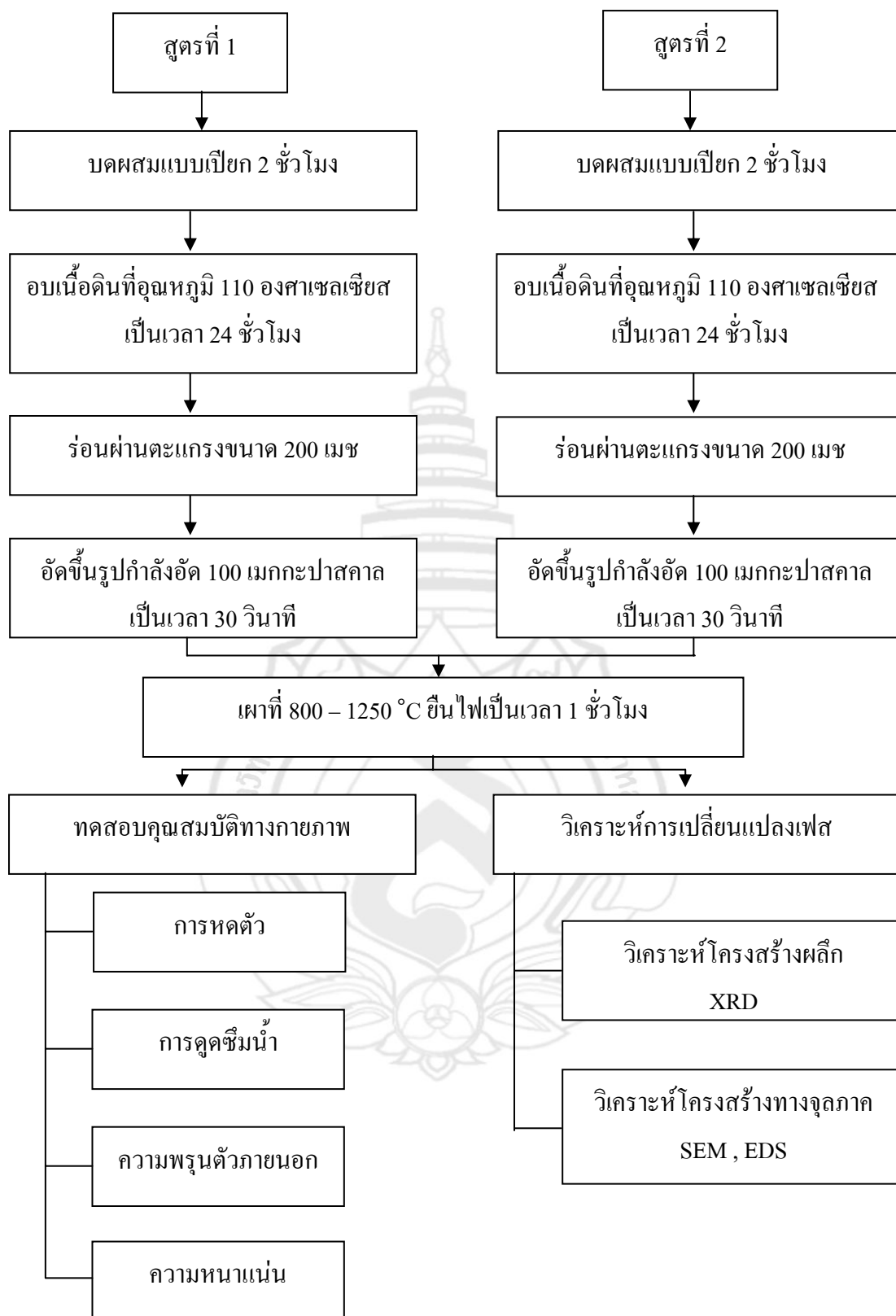
การศึกษาการเปลี่ยนแปลงเฟสของสารผสมหลังการเผาอบที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ นำชิ้นงานหลังการเผาอบมาขัดผิวหน้าด้วยเครื่องขัดชิ้นงาน (Mecapol รุ่น P320) เพื่อให้ผิวหน้าเรียบสม่ำเสมอและได้ระนาบ จากนั้นวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของชิ้นงานตัวอย่างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ในช่วงมุม 2θ เท่ากับ 5-80 องศา ความละเอียดของการเพิ่มมุม (Step size) ครั้งละ 0.016

3.2.6 การศึกษาลักษณะทางจุลภาค

หลักการของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดด้านบนจะมีแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (Electron gun) ซึ่งทำหน้าที่ปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกมา (Primary electron) โดยจะควบคุมจำนวนอิเล็กตรอนด้วยศักย์ไฟฟ้าสูง อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ลงมาผ่านเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic lens) เพื่อโฟกัสให้อิเล็กตรอนสามารถตกกระทบชิ้นงานและเมื่ออิเล็กตรอนตกกระทบชิ้นงานจะได้สัญญาณแบบต่าง ๆ เช่น สัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron) จะให้ข้อมูลในลักษณะเป็นภาพพื้นผิวจริงของวัตถุมีลักษณะสูงต่ำและร่องรอยที่เกิดขึ้นจริงบนวัตถุ อิเล็กตรอนที่กระเจิงกลับ (Backscattered electron) ให้ข้อมูลในลักษณะเป็นภาพพื้นผิวของวัตถุ แต่ให้ความแตกต่างบนพื้นผิวของวัตถุในลักษณะแบ่งเป็นเฟสสว่างและเฟสมืด ขึ้นอยู่กับเลขอะตอมของธาตุที่ผสมอยู่ในวัตถุนั้นธาตุที่มีเลขอะตอมสูงกว่าจะมีเฟสที่สว่างกว่าธาตุที่มีเลขอะตอมต่ำกว่า และเอ็กซเรย์ (X-ray) จะบอกข้อมูลว่าชิ้นงานมีธาตุอะไรประกอบอยู่ โดยแสดงออกมาเป็นกราฟหรือพื้นที่ภาพที่แทนด้วยสีเพื่อบอกตำแหน่งที่อยู่ของธาตุนั้นๆ สัญญาณแต่ละชนิดจะถูกตรวจวัด

โดยตัววัดสัญญาณ (Detector) แต่ละชนิด และแปลผลเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าและแปลเป็นภาพและกราฟในที่สุด ในงานวิจัยนี้ใช้สัญญาณจากอิเล็กทรอนิกส์ภายในชิ้นงานสำหรับการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ โดยเมื่อเผาอบผนึกและขัดผิวหน้า นำชิ้นงานไปกัดผิวด้วยกรด HF ความเข้มข้น 4 เปอร์เซ็นต์ เป็นเวลา 1 นาที เพื่อกัดส่วนที่เป็นแก้วออกทำให้สามารถมองเห็นผลึกที่เกิดภายในเนื้อดิน หลังการกัดกรดให้ทำความสะอาดชิ้นงานด้วยเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 10 นาที แล้วจึงนำไปอบที่อุณหภูมิประมาณ 110 องศาเซลเซียส ชิ้นงานที่ผ่านการกัดกรดจะต้องเคลือบผิวหน้าด้านที่ขัดผิวด้วยทอง โดยใช้เทคนิคสปัตเตอริง (Sputtering) จากนั้นนำชิ้นงานวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM : JEOL รุ่น JSM-5410LV) โดยใช้การตรวจจับสัญญาณภาพแบบสัญญาณจากอิเล็กทรอนิกส์ทุกขุม ใช้ Spot size 250 และใช้แรงเคลื่อนไฟฟ้า 10 กิโลโวลต์ และศึกษาองค์ประกอบทางเคมีด้วยด้วยเทคนิค EDS ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ซึ่งเป็นวิธีการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีเฉพาะจุดเพื่อยืนยันจุดที่ต้องการศึกษา





ภาพที่ 3.3 แผนผังการวิจัยในขั้นตอนที่ 2

3.3 วิธีดำเนินงานวิจัยตอนที่ 3

การทดสอบเพื่อหาอุณหภูมิที่เหมาะสมกับเนื้อดินและศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับ ความขาว ความโปร่งแสง และสมบัติเชิงกลของเนื้อดินที่ถูกเลือกจากการวิจัยตอนที่ 2 ในขั้นตอนนี้ผู้วิจัยได้เตรียมขึ้นทดสอบและจำนวนขึ้นทดสอบเช่นเดียวกับขั้นตอนที่ 2 และศึกษาสมบัติทางกายภาพ ศึกษาการเปลี่ยนแปลงเฟสเช่นเดียวกัน และศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการทดสอบความขาว ทดสอบความโปร่งแสง ทดสอบความแข็งแรง และทดสอบค่าความต้านทานการแตกร้าว

3.3.1 การเผาอบผืน

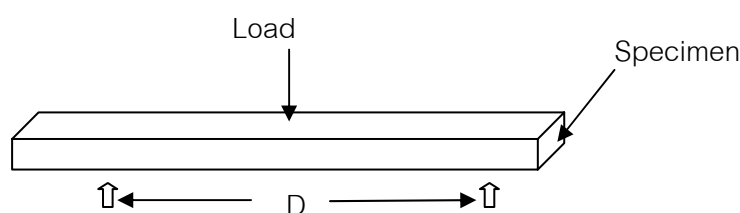
การเผาอบผืนสำหรับงานวิจัยในขั้นตอนที่ 2 เลือกศึกษาอุณหภูมิการเผาอบผืนที่ 1,220 – 1,250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ซึ่งเตาที่ใช้ในขั้นตอนการเผาอบผืนเป็นเตาไฟฟ้าที่สามารถทนอุณหภูมิสูง 1,500 องศาเซลเซียส

3.3.2 การทดสอบความแข็งแรง (Flexural strength)

การทดสอบความแข็งแรง (Flexural strength) ของแท่งทดสอบหลังเผา ด้วยเครื่องทดสอบ UTM คำนวนหาค่ากำลังรับแรงอัดจากสมการ 3.5

$$\sigma = \frac{3LD}{2bd^2} \quad ..3.5$$

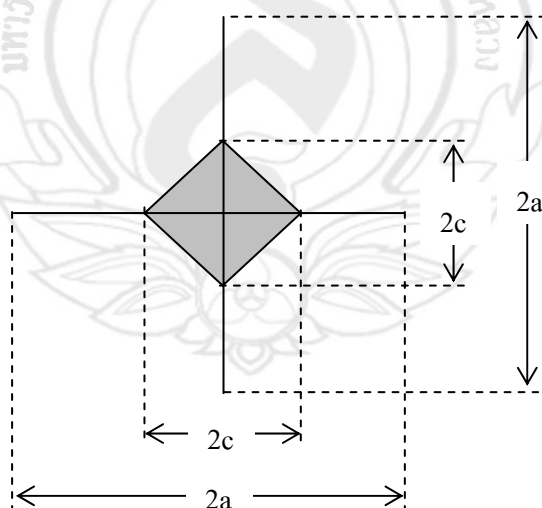
- โดยที่
- σ คือ ความแข็งแรง
 - L คือ คำนวณน้ำหนักแรงกด
 - D คือ ระยะห่างของลิ่มที่รองรับแท่งทดสอบ
 - d คือ ความหนาของแท่งทดสอบ
 - b คือ ความกว้างของแผ่นทดสอบ



ภาพที่ 3.4 ตัวอย่างขั้นตอนทดสอบค่าความแข็งแรง

3.3.3 การวัดค่าความต้านทานการแตกร้าว (Fracture toughness)

ค่าความต้านทานการแตกร้าว (Fracture toughness) หาได้จากรอยร้าวที่เกิดขึ้นจากการกดด้วยเทคนิค Indentation โดยใช้หัวกดแบบ Vicker รูปปิรามิด ทำการเตรียมตัวอย่างโดยขัดผิวหน้าเพื่อให้ได้ระนาบและผิวเรียบยิ่งขึ้น และสุดท้ายทำการขัดมันโดยใช้ผงขัดเพชรความละเอียดสูงสุด 1 ไมโครเมตร จากนั้นนำไปทดสอบด้วยเครื่อง Micro hardness tester และนำขั้นตอนทดสอบที่กดแล้วไปวัดความยาวของรอยร้าวที่เกิดขึ้นดังแสดงในรูปที่ 3.5 ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จากนั้นนำค่าที่ได้มาหาค่าความต้านทานการแตกร้าวจากสมการ 3.6 (Meyers&Chawla, 1999)



ภาพที่ 3.5 แบบจำลองรอยร้าวที่เกิดจากการทดสอบด้วยหัวกดแบบ Vicker

$$K_{Ic} = \delta \left(\frac{E}{H} \right)^{1/2} \frac{P}{a^{3/2}} \quad \dots 3.6$$

โดยที่ δ = geometrical factor (0.016 ± 0.004 เมื่อทดสอบด้วยหัวกดแบบ Vickers)

E = Elastic modulus (GPa)

H = ความแข็ง (GPa)

P = แรงกด (N)

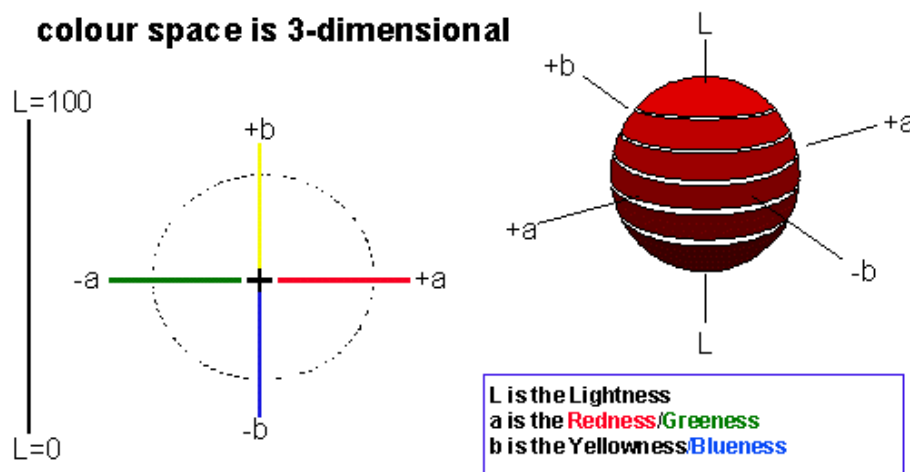
a = รัศมีรอยร้าว (m)

3.3.4 การทดสอบสี

การทดสอบสีของชิ้นตัวอย่างหลังการเผา นำไปทดสอบด้วยเครื่องวัดสี (Color Quest XE Spectrophotometer; Serial No CQX2339) การทดสอบสีสามารถทำได้โดยการใช้ Commission International de l'Eclairage (CIE) คือระบบ $L^*a^*b^*$ ซึ่งเป็นระบบการบรรยายสีแบบ 3 มิติ โดยที่ แกน L^* จะบรรยายถึงความสว่าง (Lightness) จากค่า $+L^*$ แสดงถึงสีขาว จนถึง $-L^*$ แสดงถึงสีดำ แกน a^* จะบรรยายถึงแกนสีจากเขียว ($-a^*$) ไปจนถึงแดง ($+a^*$) ส่วนแกน b^* จะบรรยายถึงแกนสีจากน้ำเงิน ($-b^*$) ไปเหลือง ($+b^*$) อุปกรณ์วัดสีที่นิยมใช้ในปัจจุบันคือ spectrophotometer อุปกรณ์ดังกล่าวจะใช้แสงจากแหล่งประดิษฐ์ (Illuminant) คือแสงที่แต่งค่าความเข้มแสง (Intensity) หรือ อุณหภูมิของสี (Color temperature) แล้ว ตัวอย่างของแหล่งแสงประดิษฐ์ได้แก่ D65 – แสงเที่ยงวัน (Noon daylight) A- แสงส้มจากหลอดทั้งสแตนด์ C – แสงกลางวันเฉลี่ย (Average daylight) CWF – แสงขาวเย็นจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ (Cooled white fluorescent) ระบบ CIE $L^*a^*b^*$ เป็นวิธีการวัดสีที่ใช้ลักษณะของ color space ดังภาพที่ 3.6 ชิ้นตัวอย่างสำหรับใช้ทดสอบสีต้องมีขนาดไม่ต่ำกว่า 1 ตารางเซนติเมตร

CIELAB

colour space is 3-dimensional



ภาพที่ 3.6 วิธีการวัดสีระบบ CIE L*a*b* (ระบบออนไลน์ www.colourware.co.uk)

3.3.5 การทดสอบความโปร่งแสง

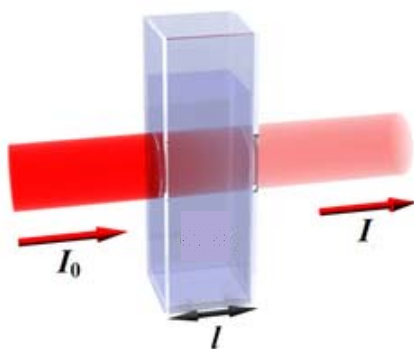
การทดสอบความโปร่งแสงของชิ้นตัวอย่างหลังการเผา นำไปทดสอบด้วยเครื่อง UV - VIS Spectrophotometer ยี่ห้อ Perkinelmer รุ่น Lamda 35 แสง UV – Visible จัดอยู่ในช่วงความยาวคลื่น 400 – 700 นาโนเมตร โดยที่แสงหรือ Radiation เมื่อส่องผ่านสารที่สามารถดูดกลืนแสงได้ แสงจะถูกดูดกลืน เรียกว่า Absorbance (A) โดยสัมพันธ์กับค่า แสงส่องผ่าน Transmittance (T) สำหรับการทดลองนี้ศึกษาค่า Transmittance โดยชิ้นตัวอย่างที่ใช้สำหรับการทดลองมีความหนา 3 มิลลิเมตร

ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับความโปร่งแสง ได้แก่ การกระเจิงของแสง (Light scattering) และการดูดกลืนของแสง (Absorption) โดยค่าสัมประสิทธิ์ของ scattering และ Absorption นี้จะได้อมาจากการจัดปฏิกิริยาการสะท้อนแสง (Reflection) และปฏิกิริยาการส่งผ่านของแสง (Transmittance) ของตัวอย่างและสามารถคำนวณ % Translucency ได้จากสูตร

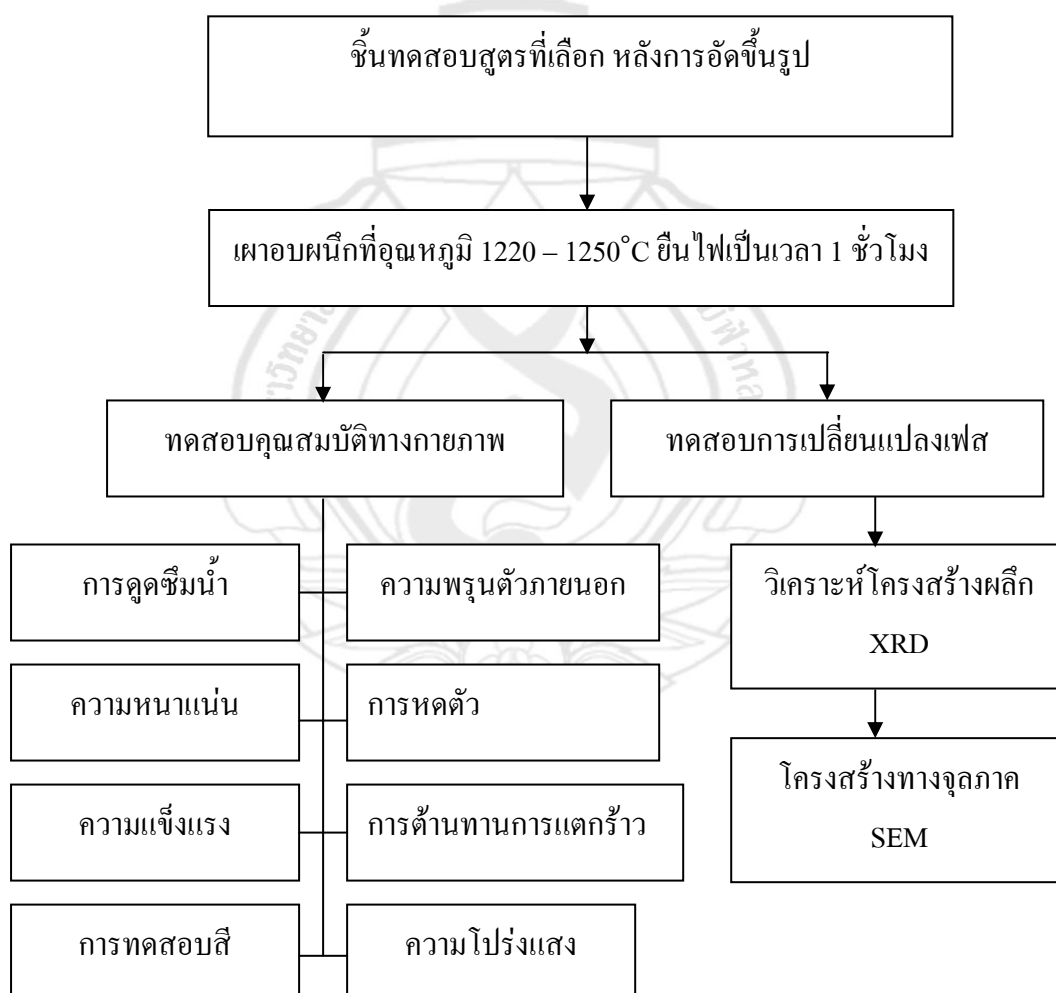
$$\% \text{Translucency} = \frac{I}{I_0} \times 100 \quad \dots 3.7$$

โดยที่ I คือ ความเข้มของแสงที่ส่องผ่านตัวอย่าง

I_0 คือ ความเข้มของแสงที่ตกกระทบ



ภาพที่ 3.7 การตกกระทบและการส่องผ่านของแสง (ระบบออนไลน์ www.wikipedia.org)



ภาพที่ 3.8 แผนผังการวิจัยขั้นตอนที่ 3

3.4 วิธีดำเนินงานวิจัยตอนที่ 4

ในขั้นตอนที่ 4 เป็นการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ด้วยวิธีการหล่อ และเผาผลิตภัณฑ์ หลังจากได้ผลการทดลองในขั้นตอนที่ 3 ซึ่งมีวิธีการดังต่อไปนี้

3.4.1 การขึ้นรูปแบบพิมพ์ด้วยปูนพลาสติกอร์

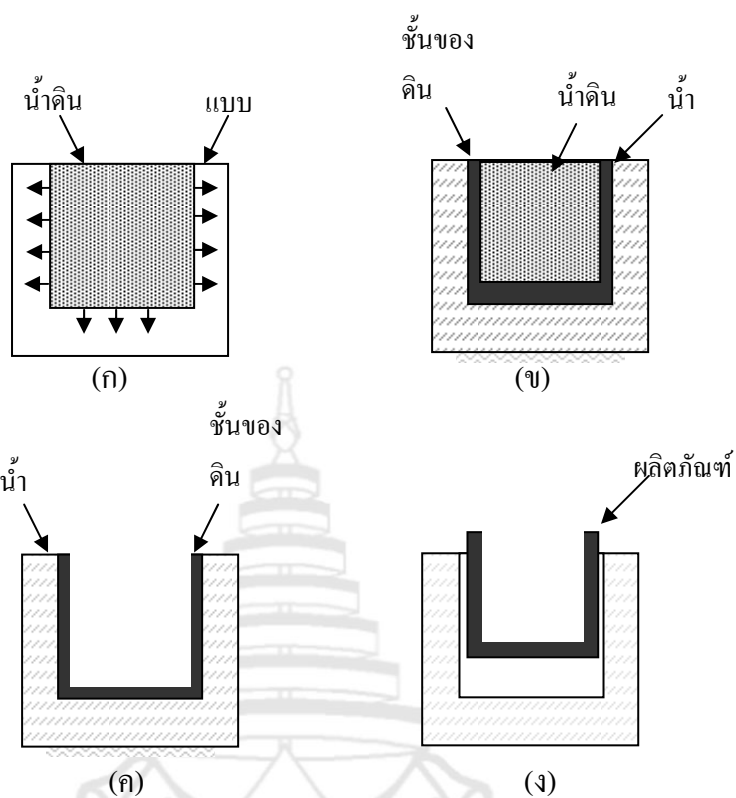
1. ขึ้นรูปต้นแบบด้วยปูนพลาสติกอร์
2. ทา Potassium Soap ลงบนต้นแบบทิ้งไว้ 1 นาที เช็ดออกด้วยน้ำ ทำซ้ำในขั้นตอนนี้ 2 - 3 รอบ
3. กั้นแม่พิมพ์ด้วยแผ่นสังกะสี คำนวณหาปริมาณปูนพลาสติกอร์และน้ำที่ใช้ โดยใช้น้ำ 85 ต่อ 100 ส่วน
4. เทลงบนแม่พิมพ์ที่กั้นด้วยแผ่นสังกะสีทิ้งไว้ประมาณ 10 นาที แกะสังกะสี และแม่พิมพ์ออก
5. นำแม่พิมพ์ไปอบแห้งเพื่อใช้ในการหล่อ

3.4.2 การเตรียมน้ำสลิป

1. ชั่งวัตถุดิบต่างๆตามอัตราส่วนที่กำหนด
2. กำหนดการใช้น้ำ 44, 48 และ 52 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยเติม Dispers (DP 850) ปริมาณ 0.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของวัตถุดิบ
3. นำไปบดรวมกันภายในหม้อบด เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
4. นำไปขึ้นรูปด้วยวิธีการหล่อแบบ

3.4.3 ขั้นตอนและกลไกในการหล่อแบบ

1. นำน้ำดินมาเทลงในแบบ
2. น้ำในดินจะถูกแบบพิมพ์ดูดด้วยแรงที่เกิดจากรูพรุนในแบบ (Capillary force)
3. เกิดการสะสมเป็นชั้นของดินขึ้น
4. เทน้ำดินที่เหลือออกจากแบบ
5. ตัดแต่งปากผลิตภัณฑ์
6. ปล่อยให้แห้ง
7. ถอดผลิตภัณฑ์ออกจากแบบ



ภาพที่ 3.9 ขั้นตอนและกลไกในการหล่อแบบ

บทที่ 4

ผลการทดลอง

บทที่ 4 เป็นผลการทดลองซึ่งแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนที่ 1 เป็นผลการวิเคราะห์ และการเตรียมวัตถุดิบสำหรับใช้เป็นส่วนผสมในเนื้อดินโบนไชน่าซึ่งได้แก่หินผุของบริษัทภัทรารัตน์ เคลย์แอนด์มินรัล จำกัด และหินผุของ ทีไอซี จำกัด ดินขาวที่นำมาทดลองเป็นดินขาว 3 แหล่ง คือ ดินขาวลำปาง ดินขาวระนอง และดินขาวนราธิวาส เพื่อเลือกชนิดดินขาวที่มีปริมาณของ ออกไซด์ที่ทำให้เกิดสีน้อยที่สุด ขั้นตอนที่ 2 เป็นการทดลองเพื่อเลือกเนื้อดินโดยทดสอบเนื้อดิน 2 สูตร คือ สูตรที่ 1 มีส่วนผสมคือ เถ้ากระดูก ดินขาว และ หินผุ ในอัตราส่วน 50:25:25 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก ส่วนสูตรที่ 2 คือ สูตรที่เติมโพแทสเซียมเฟลด์สปาร์ลงในสูตรที่ 1 ในปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เผอบผนิกที่อุณหภูมิ 800 - 1,250 องศาเซลเซียส ขั้นตอนที่ 3 เป็นการนำเนื้อดินที่เลือกจากการทดลองที่ 2 เพื่อทดสอบหาอุณหภูมิที่เหมาะสมกับเนื้อดิน และนำมาทดสอบเพิ่มเติมเกี่ยวกับสมบัติเชิงกล ความโปร่งแสง และสี และในขั้นตอนที่ 4 เป็นการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ด้วยวิธีการหล่อหน้าดิน

4.1 ผลการทดลองขั้นตอนที่ 1

เป็นการวิเคราะห์และการเตรียมวัตถุดิบเพื่อเลือกวัตถุดิบที่เหมาะสมกับเนื้อดินซึ่งเลือกหินผุลำปางจาก 2 บริษัท และดินขาว 3 แหล่ง

4.1.1 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี

4.1.1.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-Ray Fluorescence, XRF : Horiba รุ่น Mesa-500w) เพื่อศึกษาชนิด และปริมาณของธาตุในหินผุ ซึ่งผลที่ได้จากการวิเคราะห์จะแสดงในรูปของสารประกอบออกไซด์ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของหินผุ

ปริมาณสารประกอบออกไซด์ (เปอร์เซ็นต์)		
บริษัทภัทรารัตน์ เคลย์แอนด์		
สารประกอบออกไซด์	มีเนรล จำกัด	บริษัท ที ไอ ซี
Al_2O_3	21.03	19.55
SiO_2	73.12	73.45
K_2O	4.07	2.99
CaO	0.18	0.15
Na_2O	1.05	3.12
PbO	0.05	0.03
Fe_2O_3	0.46	0.66
Mn_2O_3	0.04	0.06
รวม	100	100

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของหินผุของทั้ง 2 บริษัท เพื่อเปรียบเทียบปริมาณของสารให้สีในหินผุซึ่งจะมีผลต่อความขาวของเนื้อดินซึ่งจะพิจารณาจากปริมาณของ Fe_2O_3 ซึ่งให้สีน้ำตาลหรือสีเขียว ผลการวิเคราะห์พบว่าปริมาณ Fe_2O_3 ในหินผุของบริษัทภัทรารัตน์ เคลย์แอนด์ มีเนรล จำกัด มีปริมาณ 0.46 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งน้อยกว่าในหินผุของ บริษัท ที ไอ ซี คือ 0.66 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งความแตกต่างของสารประกอบ Fe_2O_3 เพียงเล็กน้อยจะมีผลต่อสีที่เกิดขึ้น (อายุวัฒนสว่างผล, 2543) นอกจากนั้นในหินผุยังประกอบด้วยสารที่ให้สีอีกตัวคือ Mn_2O_3 ซึ่งจะให้สีน้ำตาล จากผลการวิเคราะห์พบว่าปริมาณที่พบในหินผุจากบริษัทภัทรารัตน์ เคลย์แอนด์มีเนรล จำกัด มีปริมาณ 0.04 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งน้อยกว่าในหินผุของ บริษัท ที ไอ ซี คือ 0.06 เปอร์เซ็นต์

เมื่อพิจารณาจากองค์ประกอบในหินผุของทั้ง 2 บริษัท พบว่ามีสารออกไซด์ของ K_2O CaO Na_2O PbO เป็นตัวหลอมละลาย โดยรวมแล้วพบว่าปริมาณตัวหลอมละลายในหินผุของบริษัท ที ไอ ซี จำกัด มีปริมาณมากกว่าในหินผุของบริษัทภัทรารัตน์ เคลย์แอนด์มีเนรล จำกัด แต่เมื่อเปรียบเทียบในแต่ละตัวพบว่า ปริมาณของ K_2O ในหินผุของบริษัทภัทรารัตน์ เคลย์แอนด์มีเนรล จำกัด มีปริมาณมากกว่า บริษัท ที ไอ ซี ประมาณ 1 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณของ CaO และ PbO มี

ปริมาณที่ใกล้เคียงกัน แต่ปริมาณของ Na_2O ในหินผุของบริษัท ที ไอ ซี จำกัด มีปริมาณมากกว่าหินผุของบริษัทภัทรรัตน์ เคลย์แอนมิเนรัล จำกัด ประมาณ 2 เปอร์เซ็นต์ วัตถุดิบที่มีโพแทสเซียมเฟลด์สปาร์ มีจุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิ ประมาณ 1,200 องศาเซลเซียส ซึ่งสูงกว่าวัตถุดิบที่มีโซดาเฟลด์สปาร์ซึ่งมีจุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิ ประมาณ 1,170 องศาเซลเซียส ซึ่งจะมีผลต่อความบิดเบี้ยวของชิ้นงานหลังเผา เนื่องจากแก้วที่เกิดมาจากวัตถุดิบที่มีโซดาเฟลด์สปาร์มีความหนืดต่ำกว่าวัตถุดิบที่มี โพแทสเซียมเฟลด์สปาร์ (อายุวัฒน์ สว่างผล, 2543)

นอกจากนั้นในหินผุยังประกอบด้วย Al_2O_3 และ SiO_2 แต่จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีไม่สามารถระบุได้ว่าเป็นองค์ประกอบของแร่ใดบ้างดังนั้นต้องนำหินผุไปวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ต่อไป

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้หินผุที่มีสารให้สีที่มีปริมาณน้อยและสามารถเป็นตัวหลอมละลายที่อุณหภูมิสูงได้ดี ซึ่งเป็นหินผุของบริษัทภัทรรัตน์ เคลย์แอนมิเนรัล จำกัด

4.1.1.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของชิ้นตัวอย่างด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-Ray Fluorescence, XRF : Horiba รุ่น Mesa-500w) ของดินขาวราธิวาส ดินขาวลำปาง และดินขาวระนอง หลังผ่านการร่อนด้วยตะแกรงขนาด 325 เมช โดยชิ้นตัวอย่างถูกไปทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของดินขาว

สารประกอบ ออกไซด์	ปริมาณสารประกอบออกไซด์ (เปอร์เซ็นต์)		
	ดินขาวนาฬิกา	ดินขาวลำปาง	ดินขาวระนอง
Al_2O_3	37.45	28.34	35.86
SiO_2	59.59	65.97	59.79
K_2O	1.09	4.24	2.22
CaO	0.07	-	0.14
PbO	-	0.12	-
Fe_2O_3	0.74	1.10	1.85
TiO_2	1.04	0.08	0.07
Mn_2O_3	-	0.15	0.07
ZrO_2	0.02	-	-
รวม	100	100	100

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของดินขาวทั้ง 3 แหล่ง เพื่อเปรียบเทียบสารที่ให้สีในดินขาว ผลการวิเคราะห์พบว่าในดินขาวมีสารประกอบของ TiO_2 , Fe_2O_3 และ Mn_2O_3 ซึ่งให้สีเหลืองหรือครีม สีน้ำตาลหรือเขียว และสีน้ำตาล ตามลำดับ ในดินขาวนาฬิกาและดินขาวระนองโดยรวมแล้วมีปริมาณสารให้สีที่ใกล้เคียงกันแต่ในดินขาวระนองมีปริมาณ Fe_2O_3 ซึ่งจะให้น้ำตาลหรือสีเขียวมากกว่าในดินขาวนาฬิกา ซึ่งจะมีผลต่อความขาวมากกว่า เนื่องจาก ปริมาณของ Fe_2O_3 เพียงเล็กน้อย 1-2 เปอร์เซ็นต์ ก็สามารถทำให้เกิดสีได้ชัดเจนกว่าดินขาวที่มีสารประกอบของ TiO_2 ในปริมาณที่เท่ากัน และเมื่อเปรียบเทียบดินขาวนาฬิกา กับดินขาวลำปางพบว่าในดินขาวลำปางมีสารที่ให้สีโดยรวมเป็นปริมาณน้อยกว่าในดินขาวนาฬิกา แต่ปริมาณของ Fe_2O_3 มีมากกว่าในดินขาวนาฬิกา นอกจากนั้นในดินขาวมีสารประกอบของ ZrO_2 ซึ่งให้เกิดความทึบแสง แต่จะมีผลต่อความทึบแสงหากผสมอยู่ในปริมาณ 4-5 เปอร์เซ็นต์ (อายุวัฒน์ สว่างผล, 2543)

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของดินขาว 3 แหล่ง คือ ดินขาวนาฬิกา ดินขาวลำปาง และดินขาวระนอง โดยส่วนประกอบหลักของดินขาวคือ Al_2O_3 และ SiO_2 ซึ่งในดินขาวนาฬิกา และดินขาวระนองมีปริมาณ Al_2O_3 และ SiO_2 ใกล้เคียงกัน แต่ในดินขาวลำปางมีปริมาณ

Al_2O_3 น้อยกว่า และมีปริมาณ SiO_2 มากกว่าในดินขาวนาธิวาส และดินขาวระนอง จากผลการวิเคราะห์ค่าดินขาวที่มี Al_2O_3 สูงจะมีผลต่อความเหนียวและอาจมีผลต่อการเกิดผลึกอะนอร์ไทต์ ส่วนดินขาวที่มี SiO_2 สูงจะมีผลต่อความทนไฟ ดังนั้นการใช้ดินขาวนาธิวาสมี Al_2O_3 สูงและ SiO_2 ต่ำ หากนำมาเป็นส่วนผสมในเนื้อดินอาจจะส่งผลดีต่อเนื้อดินที่สุด

ในงานวิจัยนี้ต้องการเนื้อดินที่มีความขาวซึ่งเป็นลักษณะเด่นดังนั้นในการเลือกดินขาวจึงพิจารณาจากปริมาณ Fe_2O_3 ซึ่งพบน้อยที่สุดในดินขาวนาธิวาส

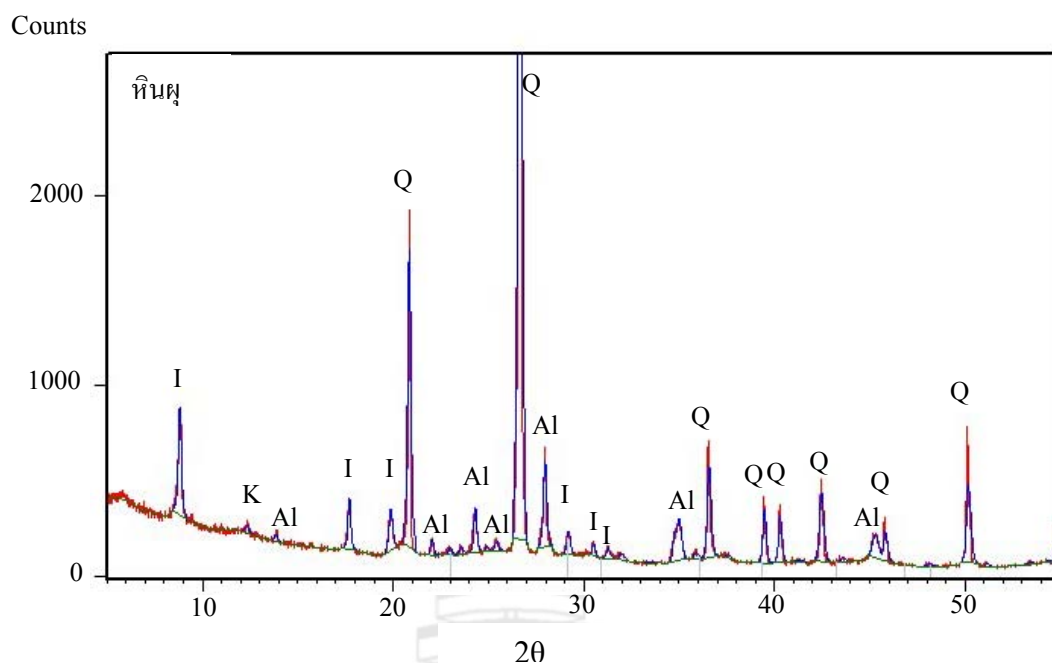
4.1.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ในหินผุ

4.1.2.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ในหินผุ ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ เพื่อศึกษาชนิดของแร่ในหินผุ จากบริษัทภัทรรัตน์ เคลย์แอนดัมมิเนรัล จำกัด ซึ่งผลที่ได้จากการวิเคราะห์แสดงในภาพที่ 4.1 พบว่าในหินผุ ประกอบด้วยแร่โอลิไคต์ ($\text{K}_{1-1.5} \text{Al}_4 [\text{Si}_{7-6.5} \text{Al}_{1-1.5} \text{O}_{20}] (\text{OH})_4$) เกลโอลิไนต์ ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5 (\text{OH})_4$) อัลไบต์ ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) และควอตซ์ (SiO_2) ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ทางเคมีที่มีสารประกอบของ K_2O Al_2O_3 Na_2O และ SiO_2 ตามลำดับ

จากนั้นนำผลจากการวิเคราะห์ทางเคมี และ ผลวิเคราะห์ทางแร่มาใช้ร่วมกันในการคำนวณปริมาณแร่ (Wattanasiriwech et al., 2008) ซึ่งแสดงตารางการคำนวณในตารางที่ 4.3 จากการคำนวณหาปริมาณแร่ในหินผุผลแสดงไว้ในตารางที่ 4.4 พบว่าในหินผุประกอบด้วยแร่โอลิไคต์ และแร่อัลไบต์ ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวหลอมละลายในหินผุ นอกจากนั้นประกอบด้วยเกลโอลิไนต์และควอตซ์

ตารางที่ 4.3 วิธีการคำนวณหาปริมาณแร่ในหินผุ บริษัทภัทรารัตน์เคลย์แอนด์มินเนรัล จำกัด

ออกไซด์	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	CaO	Mn ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	PbO	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
	60	102	94	62	56	156	160	207	
เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	73.12	21.03	4.07	1.05	0.18	0.04	0.46	0.05	
โมล	1.22	0.21	0.04	0.02	3x10 ⁻³	2x10 ⁻³	2x10 ⁻³	2x10 ⁻⁴	
อิลไลต์	0.34	0.14	0.04						อิลไลต์ 777x0.04
777	0.88	0.07							=31.08%
อัลไบต์	0.12	0.02		0.02					อัลไบต์ 524x0.02
524	0.76	0.05							=10.48%
เคโอลิไนต์	0.10	0.05							เคโอลิไนต์ 258x0.05
258	0.66								=12.9%
ควอตซ์	0.66								ควอตซ์ 60x0.66
60									=39.6%



ภาพที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ในหินผุ

I = อิลไลต์ K = เคโอลิไนต์ Al = อัลไบต์ Q = ควอตซ์

ตารางที่ 4.4 ผลของปริมาณแร่ในหินผุจากบริษัททรารัตน์เคลย์แอนด์มินเนรัล จำกัด

ปริมาณแร่ในหินผุ (เปอร์เซ็นต์)				
อิลไลต์	อัลไบต์	เคโอลิไนต์	ควอตซ์	สารประกอบอื่นๆ
31.08	10.48	12.90	39.60	5.94

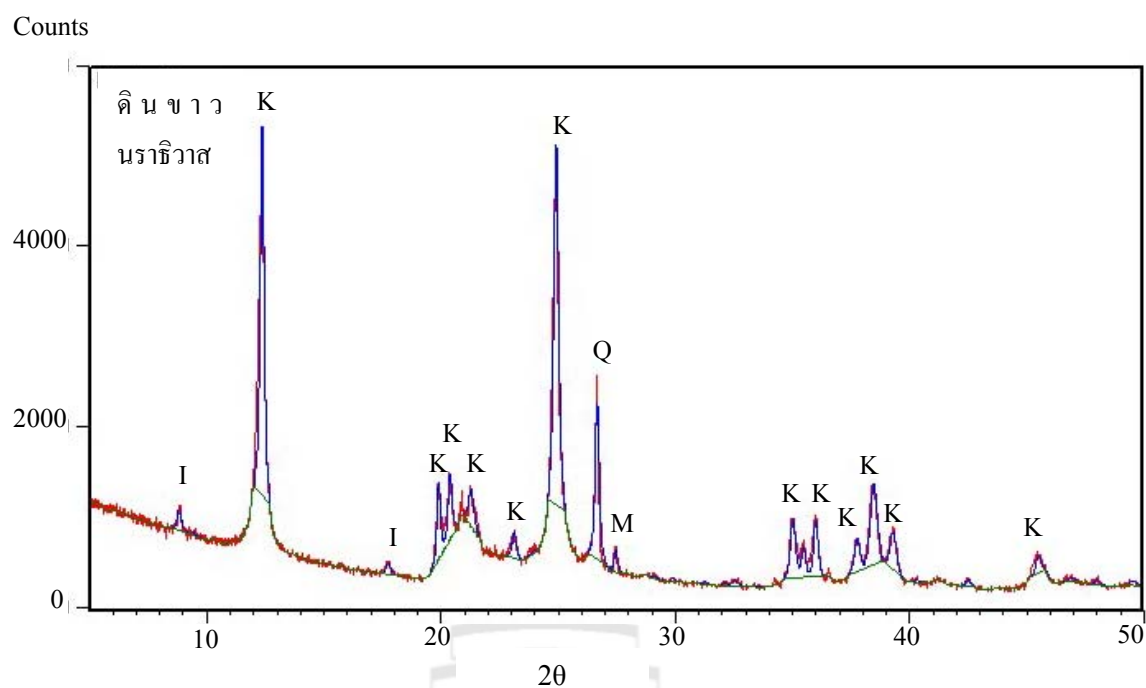
4.1.2.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ในดินขาว ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ เพื่อศึกษาชนิดของแร่ในดินขาวนาฬิกาซึ่งผลที่ได้จากการวิเคราะห์แสดงในภาพที่ 4.2 พบว่าในดินขาวนาฬิกาประกอบด้วย แร่อิลไลต์ ($K_{1-1.5} Al_4 [Si_{7-6.5} Al_{1-1.5} O_{20}] (OH)_4$) เคโอลิไนต์ ($Al_2 Si_2 O_5 (OH)_4$) ไมโครไคลน์ ($KAlSi_3 O_8$) และควอตซ์ (SiO_2) ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีที่มีสารประกอบของ K_2O , Al_2O_3 และ SiO_2

จากนั้นนำผลจากการวิเคราะห์ทางเคมีและผลวิเคราะห์ทางแร่ มาใช้คำนวณปริมาณแร่ในดินขาวร่วมกัน ซึ่งมีวิธีการคำนวณตามตารางที่ 4.5 ผลการคำนวณปริมาณแร่ในดินขาวนาฬิกาแสดงไว้ในตารางที่ 4.6 พบว่าในดินขาวนาฬิกาประกอบด้วยแร่ เคโอลิไนต์ มากที่สุด รองลงมาคือควอตซ์ นอกจากนั้นยังมีแร่อิลไลต์และแร่ไมโครไคลน์ปะปนอยู่ด้วย



ตารางที่ 4.5 วิธีการคำนวณปริมาณแร่ในดินขาวนราธิวาส

ออกไซด์	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	TiO ₂	CaO	ZrO ₂	Fe ₂ O ₃	Loss	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
	60	102	94	80	56	123	160	18	
เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	52.22	33.82	0.95	0.91	0.06	0.02	0.65	12.30	
โมล	0.87	0.33	0.01	0.01	1x10 ⁻³	1x10 ⁻⁴	4x10 ⁻³	0.68	
อิลไลต์	0.09	0.04	0.01					0.02	อิลไลต์ 777x0.01
777	0.78	0.29						0.66	=7.77%
เคโอลิไนต์	0.58	0.29						0.58	เคโอลิไนต์ 258x0.29
258	0.20							0.08	=74.82%
ควอตซ์	0.20								ควอตซ์ 60x0.20
60									=12.00 %



ภาพที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของดินขาว

K = เคโอลิไนต์ I = อิลไลต์ M = ไมโครไคลน์

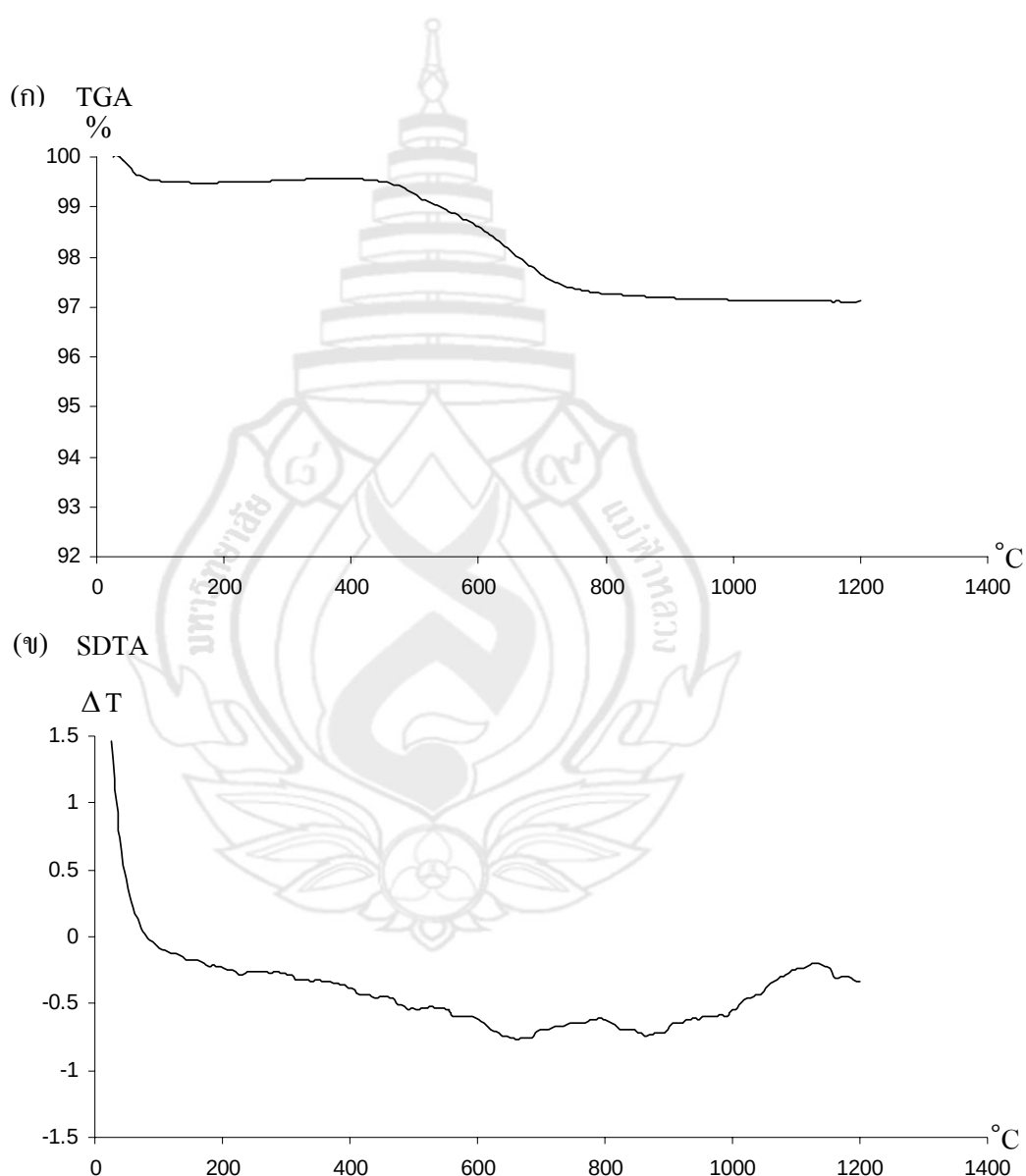
Q = ควอตซ์

ตารางที่ 4.6 ผลของปริมาณแร่ในดินขาวนราธิวาส

ปริมาณแร่ในดินขาว (เปอร์เซ็นต์)			
อิลไลต์	เคโอลิไนต์	ควอตซ์	สารประกอบอื่นๆ
7.77	74.82	12.00	5.41

4.1.3 ผลการวิเคราะห์การสลายตัวเชิงความร้อน

4.1.3.1 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของหินผุโดยใช้เทคนิค เทอโมกราวิเมตริกอะนาไลซิส (Thermogravimetric Analysis; TGA) เพื่อศึกษาน้ำหนักที่หายไปหลังการเผา ดังแสดงในภาพที่ 4.3 (ก) การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของพลังงานความร้อน ณ ช่วงอุณหภูมิต่างๆขณะทำการเผาโดย เทคนิคสิมัลเทเนียสดีฟเฟอเรนเชียลเทอร์มอลอะนาไลซิส (Simultaneous Differential Thermal Analysis ;SDTA) ดังแสดงในภาพที่ 4.3 (ข)



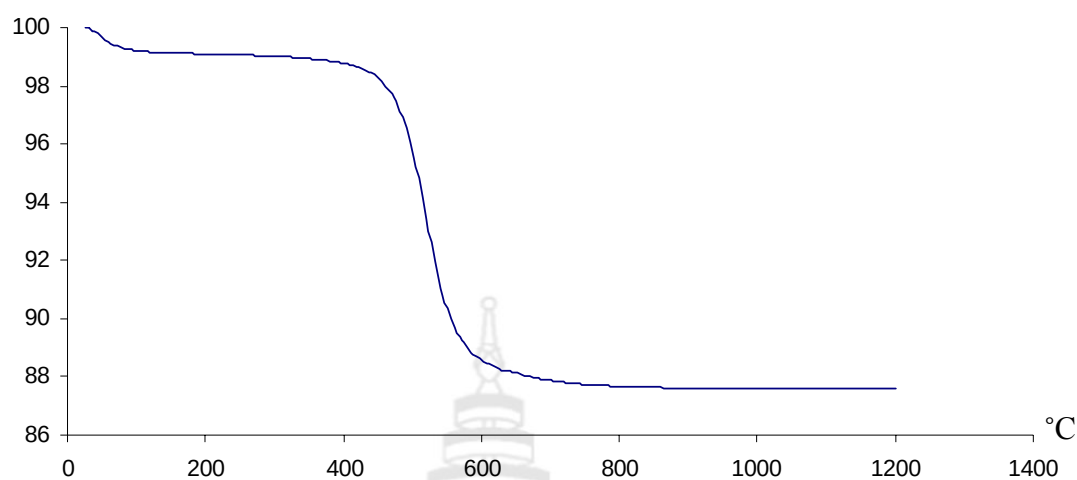
ภาพที่ 4.3 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของหินผุ

ผลจากการวิเคราะห์ทางความร้อนของหินผุ ในช่วงอุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียส แสดงในภาพที่ 4.3 (ก) ผลของความเปลี่ยนแปลงทางความร้อนซึ่งแสดงถึงน้ำหนักที่หายไป ในช่วงแรกของการเปลี่ยนแปลงอยู่ตั้งแต่อุณหภูมิห้อง ถึง ประมาณ 100 องศาเซลเซียส เกิดปฏิกิริยา Dehydration เป็นการหายไปของความชื้นที่อยู่ระหว่างอนุภาคของหินผุ ส่วนในช่วงที่ 2 จะเกิดในช่วงอุณหภูมิ 400 – 700 องศาเซลเซียส เกิดปฏิกิริยา Dehydroxylation เป็นการหายไปของน้ำที่อยู่ในโครงสร้างของเคโอลิไนต์ ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ซึ่งในหินผุมีอยู่ประมาณ 12.90 เปอร์เซ็นต์ และมีแร่โอลิไคต์ ($\text{K}_{1-1.5} \text{Al}_4 [\text{Si}_{7-6.5} \text{Al}_{1-1.5} \text{O}_{20}] (\text{OH})_4$) ในหินผุมีอยู่ประมาณ 31.08 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ TGA น้ำในโครงสร้างของแร่ทั้ง 2 ชนิด หายไปประมาณ 2.5 เปอร์เซ็นต์ หากรวมการหายไปของความชื้นระหว่างอนุภาคไปด้วยจะมีน้ำหนักที่หายไปประมาณ 3 เปอร์เซ็นต์

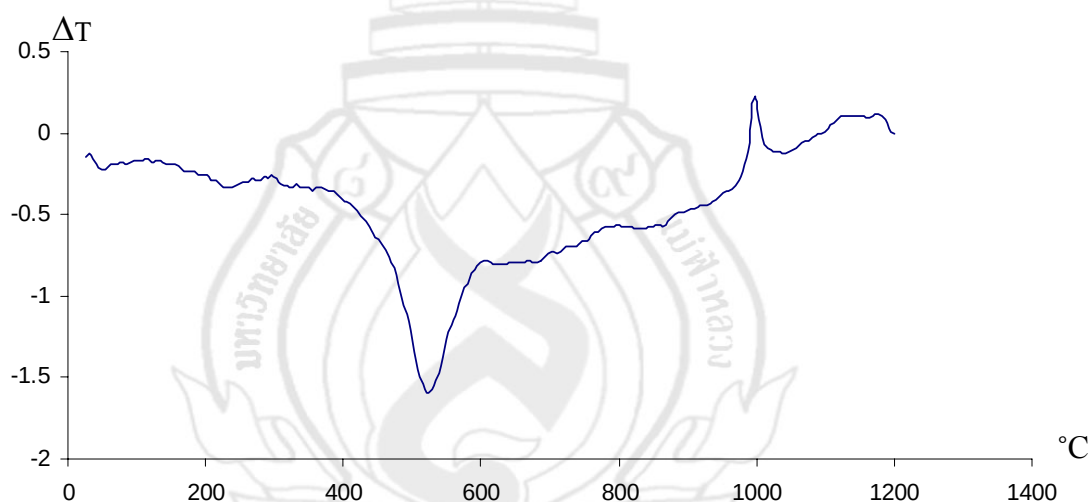
ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อน ณ ช่วงอุณหภูมิต่างๆด้วย SDTA แสดงผลไว้ดังภาพที่ 4.3 (ข) พบว่าไม่เกิดปฏิกิริยาใดที่ชัดเจน เช่นปฏิกิริยาการดูดความร้อนในช่วงอุณหภูมิ 400 – 700 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นการสูญเสียน้ำที่อยู่ในโครงสร้างผลึกทำให้โครงสร้างผลึกเปลี่ยนเป็นเมตะเคโอลินเนื่องจากในหินผุมีปริมาณแร่เคโอลิไนต์ประมาณ 13 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นที่อุณหภูมิ 980 องศาเซลเซียสจึงไม่พบสปีเนลเกิดขึ้นด้วย สำหรับโอลิไคต์จะแสดงการเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อนอยู่ 2 ช่วงคือ ที่อุณหภูมิ 596 องศาเซลเซียสเกิดการสลายของกลุ่มไฮดรอกซิลในชั้นออกตะฮีดรอล และช่วงอุณหภูมิหลัง 1,093 องศาเซลเซียส จะเกิดเป็นแก้วและมัลไลต์ขึ้น (Jiang, Li, Qiu, Fan & Huang, 2007) แต่ในงานวิจัยที่ใช้อ้างอิงนี้มีปริมาณของโอลิไคต์ถึง 85 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่หินผุที่นำมาศึกษามีปริมาณโอลิไคต์เพียงประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ อาจจะเป็นไปได้ที่จะไม่ปรากฏปฏิกิริยาที่ชัดเจน

4.1.3.2 ผลจากการวิเคราะห์ทางความร้อนของดินขาวราชีวาสโดยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริกอะนาไลซิส (Thermogravimetric Analysis ;TGA) เพื่อศึกษาน้ำหนักที่หายไปหลังการเผา ในช่วงอุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียส ซึ่งผลการเผาแสดงในภาพที่ 4.4 (ก)

(ก) TGA
%



(ข) SDTA



ภาพที่ 4.4 ความเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของดินขาว

ผลของความเปลี่ยนแปลงทางความร้อนซึ่งแสดงถึงน้ำหนักที่หายไปดินขาวจะมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ 2 ช่วง ช่วงแรกอยู่ในช่วงอุณหภูมิห้อง ถึง ประมาณ 100 องศาเซลเซียส จะเป็นการหายไปของความชื้นที่อยู่ระหว่างอนุภาคของดินขาวประมาณ 1 เปอร์เซ็นต์ ส่วนในช่วงที่ 2 จะเกิดในช่วงอุณหภูมิ 400 – 700 องศาเซลเซียส เป็นการหายไปของน้ำที่อยู่ในโครงสร้างของเคลโอลินต์ ผลการวิเคราะห์จาก TGA พบว่าน้ำหนักที่หายไปจะอยู่ประมาณ 11 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งใกล้เคียงกับการหายไปของน้ำในโครงสร้างตามทฤษฎีซึ่งมีค่า 13.95 เปอร์เซ็นต์ หากรวมเปอร์เซ็นต์การหายไปของ

ความชื้นระหว่างอนุภาคกับน้ำในโครงสร้างของดินขาวนราธิวาสจะมีการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนประมาณ 12 เปอร์เซ็นต์

ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อน ณ ช่วงอุณหภูมิต่างๆด้วยเทคนิค SDTA แสดงผลไว้ดังภาพที่ 4.4 (ข) ในการทดลองจะเริ่มวัดการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนในช่วงอุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียส ผลการทดสอบที่ช่วงอุณหภูมิ 100-200 องศาเซลเซียส แสดงการดูดพลังงานเกิดการหายไปของความชื้นที่อยู่บนพื้นผิวของอนุภาค ในช่วงอุณหภูมิ 400-600 องศาเซลเซียส แสดงการดูดความร้อนที่มีผลต่อการสูญเสียของน้ำที่อยู่ในโครงสร้างผลึก ทำให้โครงสร้างผลึกเปลี่ยนเป็นเมตะเคโอลิน ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส แสดงการคายพลังงาน เกิดการตกผลึกของเมตะเคโอลินเป็นสปีเนล ซึ่งการเปลี่ยนแปลงพลังงานทางความร้อน-ดินขาวนราธิวาสมีผลใกล้เคียงกับผลการทดลองของ Lawrence (1972)

4.1.4 ผลการหาอนุภาค

4.1.4.1 ผลการหาขนาดอนุภาคของหินผุ

1. ผลการหาอนุภาคด้วยวิธีร้อนผ่านตะแกรง

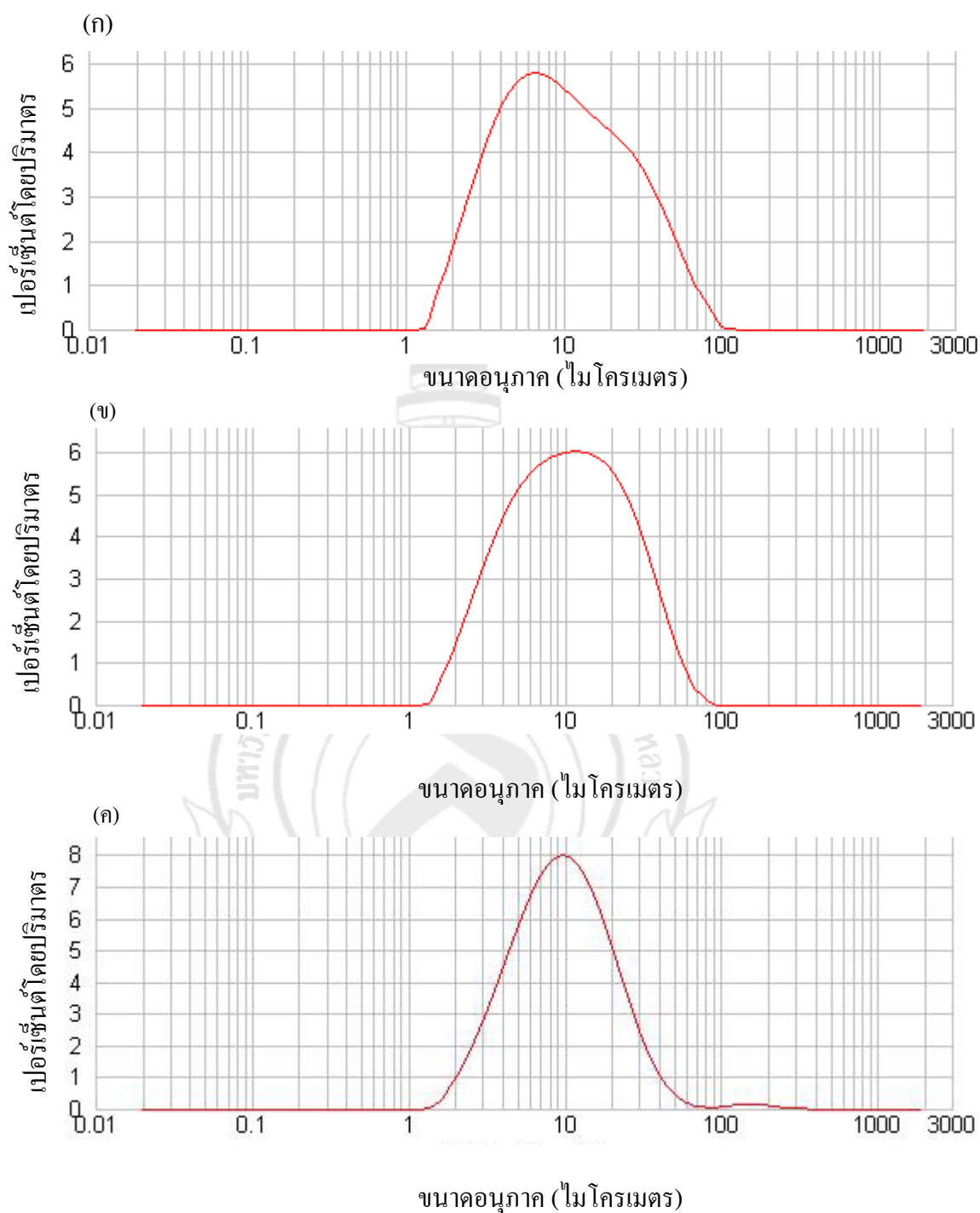
เนื่องจากหินผุมีขนาดอนุภาคใหญ่ซึ่งมีขนาดอนุภาคใหญ่กว่า 250 ไมครอนอยู่ 67.33 เปอร์เซ็นต์ สำหรับหินผุซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวหลอมละลายจะต้องมีขนาดอนุภาคประมาณ 10 ไมครอน(ไพจิตร อังศิริวัฒน์, 2541) ดังนั้นผู้วิจัยต้องการลดขนาดอนุภาคหินผุจึงได้นำหินผุมาทดสอบการบดด้วยหม้อบดความเร็วสูงที่เวลา 5 10 และ 15 นาที หลังจากนั้นนำไปกรองด้วยตะแกรงซึ่งเป็นการหาขนาดอนุภาคของหินผุแบบง่ายๆ ผลการทดลองจะบอกถึงปริมาณของกากค้างตะแกรงและปริมาณของอนุภาคหินผุที่ผ่านตะแกรง ดังแสดงในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ตารางแสดงปริมาณกากค้างตะแกรงของหินผุ

เวลาการ บด (นาทึ)	ปริมาณกากค้างตะแกรง (เปอร์เซ็นต์)					รวม
	60 เมช ($\geq 250 \mu$)	120 เมช (125-249 μ)	200 เมช (75-124 μ)	325 เมช (45-74 μ)	≤ 325 เมช ($\leq 45 \mu$)	
ก่อนบด	67.33	2.75	4.41	5.78	17.04	97.31
5	4.32	0.16	1.58	12.93	79.90	98.89
10	2.87	0.12	1.17	12.56	81.35	98.07
15	2.23	0.10	0.73	7.18	87.35	97.59

จากตารางที่ 4.7 เมื่อใช้เวลาการบดหินผุเพิ่มขึ้นช่วงละ 5 นาที พบว่าหลังการบดใน 5 นาที แรก อนุภาคขนาดใหญ่กว่า 250 ไมครอนมีปริมาณลดลงอย่างเห็นได้ชัด ส่วนอนุภาคขนาดเล็กกว่า 45 ไมครอนมีปริมาณเพิ่มขึ้น และเมื่อเพิ่มเวลาการบดเป็น 10 และ 15 นาที ปริมาณกากค้างตะแกรงตั้งแต่ 60 – 325 เมช ลดลงเพียงเล็กน้อย ส่วนอนุภาคที่ผ่านตะแกรง 325 เมช มีปริมาณเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาปริมาณกากค้างตะแกรงขนาด 60 เมช อนุภาคทั้งหมดจะเป็นหินผุที่บดไม่แตกส่วนกากค้างตะแกรงขนาด 120 เมช 200 เมช และ 325 เมช จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีพบว่า ส่วนที่ค้างตะแกรงมีองค์ประกอบของ SiO_2 มากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์

2. ผลการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของหินผุ



ภาพที่ 4.5 เป็นการแสดงการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของหินผุที่ผ่านการบดด้วยเครื่องบดความเร็วสูงเป็นเวลา 5, 10 และ 15 นาที และร่อนผ่านตะแกรง ขนาด 325 เมช

จากรูปที่ 4.5 เป็นการแสดงการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของหินผุที่ผ่านการบดด้วยเครื่องบดความเร็วสูงเป็นเวลา 5 10 และ 15 นาที และร่อนผ่านตะแกรงขนาด 325 เมช พบว่าการกระจายตัวในภาพที่ 4.5 (ก) และ (ข) อยู่ในช่วง 1 – 100 ไมโครเมตร แต่ภาพที่ 4.5 (ค) มีการกระจายตัวอยู่ในช่วง 100 – 300 ไมครอน จากผลดังกล่าวสามารถหาค่าเฉลี่ยของขนาดอนุภาคได้ดังตารางที่ 4.7 แสดงให้เห็นว่าในภาพที่ 4.5 (ก) และ (ค) หินผุมีการกระจายตัวของอนุภาค 2 ขนาดด้วยกัน ซึ่งเกิดจากการเกาะตัวกันของอนุภาคที่มีขนาดเล็ก เกาะรวมกันเป็นอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ขึ้น เนื่องจากผลของแรงดึงดูดระหว่างขั้วไฟฟ้า (Attractive Van der Waal force) ของอนุภาค ยิ่งอนุภาคมีขนาดเล็กยิ่งมีผลต่อการเกาะตัวกัน (Agglomeration) ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของหินผุหลังจากบดในเวลาที่เวลาเพิ่มขึ้นจะมีขนาดอนุภาคที่ใกล้เคียงกันและเมื่อพิจารณาจากปริมาณกากค้างตะแกรงพบว่าหินผุที่ร่อนผ่าน 325 เมช มีปริมาณใกล้เคียงกัน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงใช้เวลาในการบดหินผุเป็นเวลา 5 นาที

ตารางที่ 4.8 ผลขนาดอนุภาคของหินผุหลังการบดและร่อนผ่านตะแกรง 325 เมช

เวลาการบด (นาที)	ขนาดอนุภาค(ไมโครเมตร)			
	D(0,1)	D(0,5)	D(0,9)	D[4,3]
5	2.995	9.524	37.002	15.480
10	3.275	10.567	32.504	14.770
15	3.646	9.550	24.588	13.219

4.1.4.2 ผลการหาอนุภาคของดินขาว

1. ผลการหาขนาดอนุภาคด้วยวิธีร่อนผ่านตะแกรง

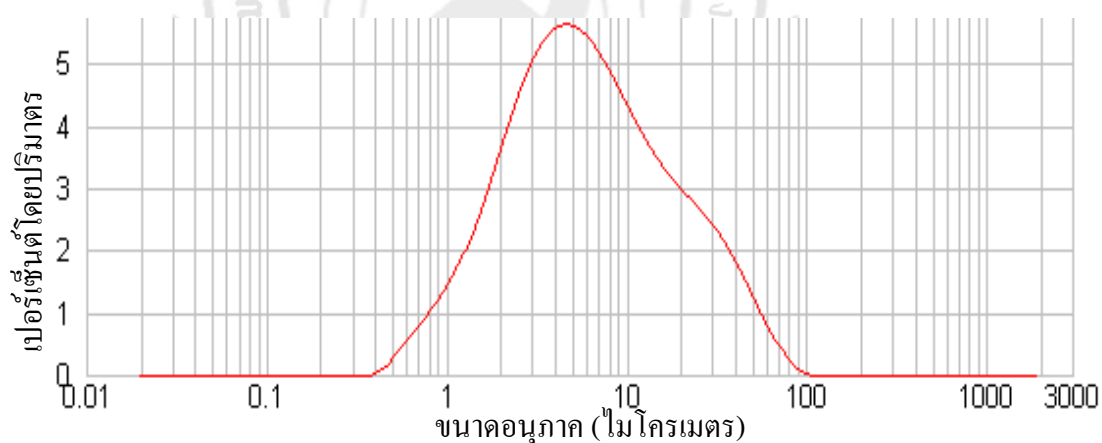
การหาขนาดอนุภาคของดินขาวด้วยวิธีการผสมแบบเปียกผลการทดลองจะบอกถึงปริมาณของกากค้างตะแกรงและปริมาณของอนุภาคดินขาวที่ผ่านตะแกรง ดังแสดงในตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ปริมาณกากค้ำตะแกรงของดินขวานราชีวาส

ปริมาณกากค้ำตะแกรง (เปอร์เซ็นต์)						
ดินขาว นราธิวาส	60 เมช	120 เมช	200 เมช	325 เมช	≤ 325 เมช	รวม
	(≥ 250 μ)	(125-249 μ)	(75-124 μ)	(45-74 μ)	(≤ 45 μ)	
	0.04	0.02	0.10	2.02	96.75	98.93

จากตารางที่ 4.9 แสดงให้เห็นว่าปริมาณกากค้ำตะแกรงของดินขวานราชีวาสขนาด 60 เมช ถึง 325 เมช มีปริมาณน้อย ซึ่งกากที่ค้ำตะแกรงขนาด 60 เมช เป็นอินทรีย์สาร เช่นเศษไม้ ส่วนกากที่ค้ำตะแกรงขนาด 120 เมช 200 เมช และ 325 เมช เป็น SiO_2 คือ ซิลิกาอิสระ ซึ่งศึกษาจากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ส่วนที่ร่อนผ่านตะแกรง 325 เมช เป็นดินขาวที่มีขนาดอนุภาคน้อยกว่า 45 ไมครอน ซึ่งมีปริมาณกว่า 96 เปอร์เซ็นต์

2. ผลการวิเคราะห์ขนาดอนุภาค



ภาพที่ 4.6 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของดินขาว
ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 325 เมช

จากผลการวิเคราะห์ดังกล่าวสามารถหาค่าเฉลี่ยของขนาดอนุภาค D (4,3) เท่ากับ 10.9 ไมโครเมตร ได้ดังตารางที่ 4.10 พบว่าการกระจายตัวอยู่ในช่วง 0.3 – 100 ไมโครเมตร

ตารางที่ 4.10 ผลขนาดอนุภาคของดินขาวนราธิวาสร่อนผ่านตะแกรง 325 เมช

ดินขาวนราธิวาส	ขนาดอนุภาค(ไมโครเมตร)			
	D(0,1)	D(0,5)	D(0,9)	D(4,3)
	1.612	5.838	27.966	10.882

4.2 ผลการทดลองขั้นตอนที่ 2

เป็นการทดลองเพื่อเลือกเนื้อดินโดยทดสอบเนื้อดิน 2 สูตร คือ สูตรที่ 1 มีส่วนผสมคือ ถ้ำกระดุก ดินขาว และ หินผุ ในอัตราส่วน 50:25:25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ส่วนสูตรที่ 2 คือ สูตรที่เติมโพแทสเซียมเฟลด์สปาร์ไปอีก 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักลงในสูตรที่ 1

การวิเคราะห์คุณสมบัติของหินผุในขั้นตอนที่ 1 หินผุนำมาใช้เป็นของบริษัทรักษ์รัตนเคลย์แอนดมินรัล จำกัด เพราะมีปริมาณออกไซด์ทำให้เกิดสีมีน้อย สำหรับดินขาวนำมาใช้เป็นดินขาวมีปริมาณออกไซด์ทำให้เกิดสีน้อยสุด คือดินขาวนราธิวาส ดังนั้นในการทดลองขั้นตอนนี้ คือ การนำวัตถุดิบข้างต้นมาผสมกับถ้ำกระดุก และโพแทสเซียมเฟลด์สปาร์ ดังตารางที่ 3.1 เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพ การเปลี่ยนแปลงเฟส และโครงสร้างทางจุลภาคภายหลังการเผาอบพูนที่อุณหภูมิ 800 – 1,250 องศาเซลเซียส

4.2.1 ผลการศึกษาสมบัติทางกายภาพ

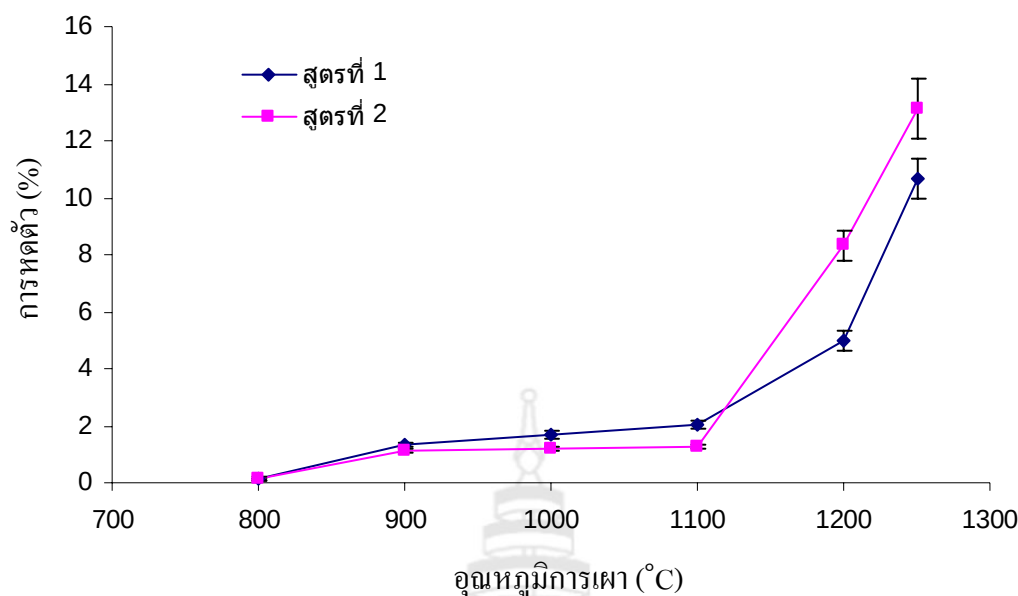
ผลการศึกษาสมบัติทางกายภาพของชิ้นทดสอบของเนื้อดินโบนไชน่า 2 สูตร คือ สูตรมาตรฐานและสูตรมาตรฐานเติมโพแทสเซียมเฟลด์สปาร์ หลังเผาที่อุณหภูมิ 800 – 1,250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำสมบัติทางกายภาพ คือ ค่าการหดตัว ค่าการดูดซึมน้ำ ค่าความพรุนตัว และค่าความหนาแน่น มาสร้างกราฟเทียบกับอุณหภูมิการเผาอบพูนซึ่งกราฟดังกล่าวจะแสดงไว้ในภาพที่ 4.7 – 4.10 สำหรับผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกและผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคผลจะแสดงไว้ในภาพที่ 4.11-4.20

4.2.1.1 ผลการวัดค่าการหดตัว

ผลการศึกษาค่าการหดตัวของเนื้อดิน แสดงดังภาพที่ 4.7 สูตรที่ 1 เป็นสูตรมาตรฐาน และสูตรที่ 2 เป็นสูตรมาตรฐานที่เติมโพแทสเซียมเฟลด์สปาร์ จากการทดลองพบว่าที่อุณหภูมิการเผาที่ 800 – 1,100 องศาเซลเซียส ค่าการหดตัวของทั้ง 2 สูตร ไม่แตกต่างกันและมีค่าการหดตัวต่ำกว่า 2 เปอร์เซ็นต์ แสดงว่าความร้อนในอุณหภูมิช่วงนี้ไม่มีผลต่อการหลอมของหินผุ และเฟลด์สปาร์ แต่หลังจากการเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้นคือ 1,200 และ 1,250 องศาเซลเซียส พบว่าเนื้อดินทั้ง 2 สูตรมีค่าการหดตัวเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน เนื่องจากตัวหลอมละลายที่ผสมอยู่ในเนื้อดินหลอมละลายมากขึ้น แต่เนื้อดินสูตรที่ 2 มีค่าการหดตัวสูงกว่าสูตรที่ 1 เนื่องจากปริมาณตัวหลอมละลายของสูตรที่ 2 มีมากกว่าสูตรที่ 1 ซึ่งหน้าที่ของตัวหลอมละลายเมื่อเผาอุณหภูมิสูงขึ้นจะเปลี่ยนเป็นของเหลวซึ่งจะเป็นตัวช่วยที่ทำให้อนุภาคเคลื่อนที่ชิดกันทำให้ช่องว่างระหว่างอนุภาคลดลงจึงทำให้การหดตัวมากขึ้น

ตารางที่ 4.11 ค่าการหดตัวของเนื้อดิน 2 สูตรหลังเผาที่อุณหภูมิ 800 – 1250 องศาเซลเซียส

เนื้อดิน	อุณหภูมิการเผา (°C)					
	800	900	1000	1100	1200	1250
สูตรที่ 1	0.13 ± 0.04	1.33 ± 0.08	1.67 ± 0.12	2.04 ± 0.12	4.96 ± 0.36	10.64 ± 0.71
สูตรที่ 2	0.15 ± 0.06	1.09 ± 0.07	1.22 ± 0.07	1.25 ± 0.09	8.34 ± 0.53	13.14 ± 1.07



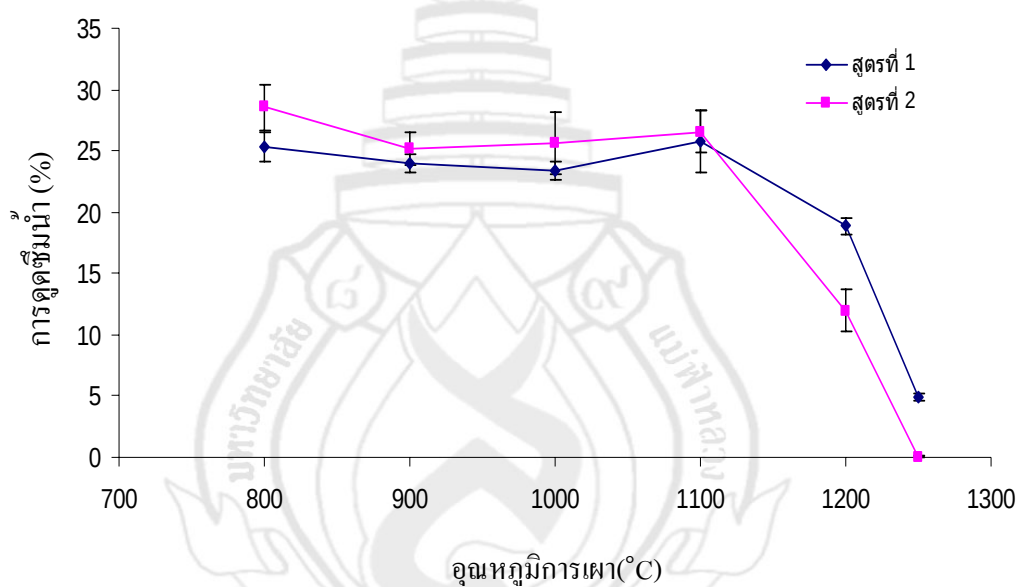
ภาพที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการหดตัวของเนื้อดิน 2 สูตร
กับการเผาที่อุณหภูมิ 800 -1,250 องศาเซลเซียส

4.2.1.2 ผลการวัดค่าการดูดซึมน้ำ

ผลการศึกษาค่าการดูดซึมน้ำของเนื้อดิน แสดงดังภาพที่ 4.8 ค่าการดูดซึมน้ำมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการเผาที่อุณหภูมิ 800 - 1,100 องศาเซลเซียส ค่าการดูดซึมน้ำของเนื้อดินทั้ง 2 สูตร ยังไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่การดูดซึมน้ำของเนื้อดินลดลงอย่างรวดเร็วหลังการเผาที่อุณหภูมิ 1,200 และ 1,250 องศาเซลเซียส ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าการหดตัว เมื่อเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้นช่องว่างระหว่างอนุภาคลดลงทำให้ปริมาณรูพรุนลดลงเช่นกัน เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 1,250 องศาเซลเซียส ค่าการดูดซึมน้ำของเนื้อดินสูตรที่ 2 มีค่า 0.03 เปอร์เซ็นต์ซึ่งน้อยกว่าสูตรที่ 1 ซึ่งมีค่า 4.96 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นค่าการดูดซึมน้ำในสูตรที่ 2 มีค่าน้อยกว่า 2 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจากการทบทวนเอกสารพบว่าผลิตภัณฑ์โบนไชน่าต้องมีค่าการดูดซึมน้ำน้อยกว่า 2 เปอร์เซ็นต์ (McColm, 1994) ดังนั้นจึงมีเฉพาะเนื้อดินสูตรที่ 2 ซึ่งเผาที่อุณหภูมิ 1,250 องศาเซลเซียส เท่านั้นที่แสดงสมบัติตรงตามข้อกำหนดนี้

ตารางที่ 4.12 ค่าการดูดซึมน้ำของเนื้อดิน 2 สูตรหลังเผาที่อุณหภูมิ 800 – 1,250 องศาเซลเซียส

เนื้อดิน	อุณหภูมิการเผา (°C)					
	800	900	1000	1100	1200	1250
สูตรที่ 1	25.29 ± 1.18	23.93 ± 0.72	23.33 ± 0.76	25.80 ± 2.54	18.85 ± 0.64	4.96 ± 0.30
สูตรที่ 2	28.58 ± 1.86	25.15 ± 1.29	25.65 ± 2.55	26.57 ± 1.69	11.98 ± 1.71	0.03 ± 0.06



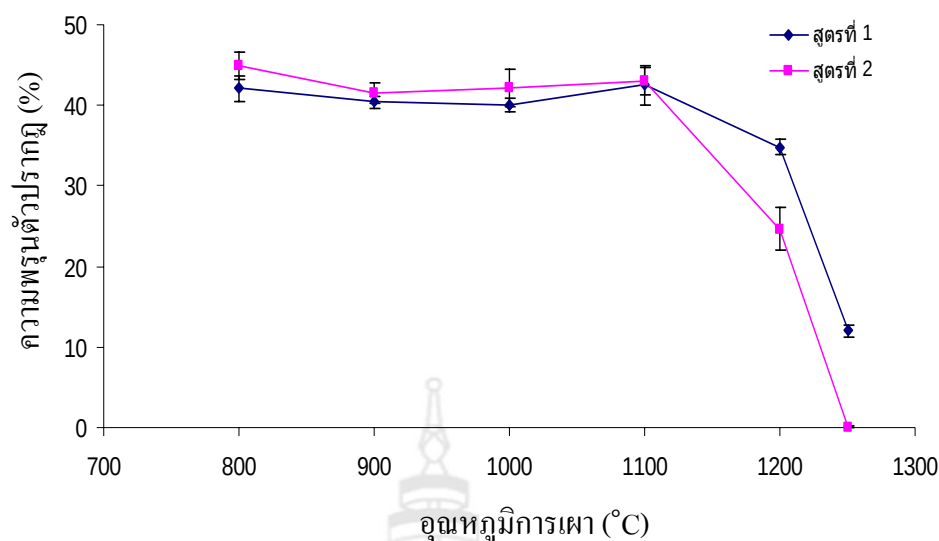
ภาพที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซึมน้ำของเนื้อดิน 2 สูตรกับการเผาที่อุณหภูมิ 800 -1,250 องศาเซลเซียส

4.2.1.3 ผลการวัดค่าความพรุนตัวปรากฏ

ผลการศึกษาค่าความพรุนตัวปรากฏของเนื้อดิน แสดงดังภาพที่ 4.9 จากการทดลอง หลังเผาที่อุณหภูมิ 800 – 1,100 องศาเซลเซียส ไม่แตกต่างกัน แต่หลังเผาที่อุณหภูมิ 1,200 และ 1,250 องศาเซลเซียส ทั้ง 2 สูตรมีแนวโน้มลดลงเช่นเดียวกัน จะเห็นว่าค่าความพรุนตัวปรากฏมีความสัมพันธ์กับค่าการการดูดซึมน้ำ ซึ่งเมื่อเผาอุณหภูมิสูงขึ้นช่องว่างระหว่างอนุภาคลดลงทำให้ความพรุนตัวลดลงเช่นกัน ค่าความพรุนตัวปรากฏของเนื้อดินสูตรที่ 2 หลังจากเผาที่อุณหภูมิ 1,250 องศาเซลเซียส มีค่า 0.07 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งต่ำกว่าเนื้อดินสูตรที่ 1 ซึ่งมีค่า 12.02 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 1,250 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.13 ค่าความพรุนตัวปรากฏของเนื้อดิน 2 สูตรหลังเผาที่อุณหภูมิ 800 – 1250 องศาเซลเซียส

เนื้อดิน	อุณหภูมิการเผา (°C)					
	800	900	1000	1100	1200	1250
สูตรที่ 1	42.13 ± 1.62	40.46 ± 0.74	40.02 ± 0.82	42.49 ± 2.37	34.78 ± 0.92	12.02 ± 0.72
สูตรที่ 2	44.94 ± 1.63	41.47 ± 1.28	42.19 ± 2.30	42.99 ± 1.64	24.68 ± 2.68	0.07 ± 0.15



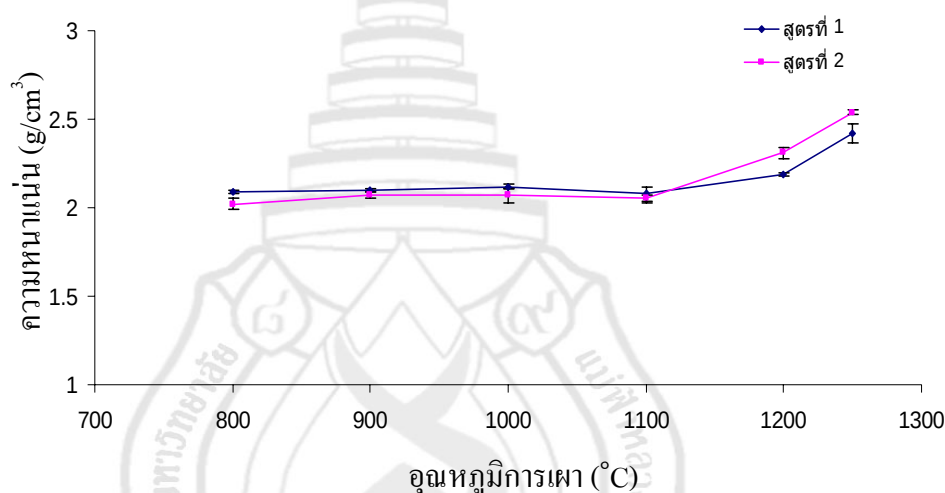
ภาพที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความพรุนตัวปรากฏของเนื้อดิน 2 สูตรกับการเผาที่อุณหภูมิ 800-1250 องศาเซลเซียส

4.2.1.4 ผลการวัดค่าความหนาแน่น

ผลการศึกษาค่าความหนาแน่นของเนื้อดินโบนไชน่าทั้ง 2 สูตร เผาที่อุณหภูมิ 800 – 1,250 องศาเซลเซียส แสดงในตารางที่ 4.11 และเมื่อสร้างกราฟระหว่างค่าความหนาแน่นกับอุณหภูมิการเผา แสดงดังภาพที่ 4.10 พบว่าความหนาแน่นไม่มีความแตกต่างกันในช่วงอุณหภูมิ 800 -1,100 องศาเซลเซียส และแสดงแนวโน้มสูงขึ้นหลังเผา 1,200 และ 1,250 องศาเซลเซียส ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าการดูดซึมน้ำคือชิ้นงานที่มีการดูดซึมน้ำน้อยจะมีค่าความหนาแน่นสูง ส่วนชิ้นงานในสูตรที่ 1 มีค่าความหนาแน่นประมาณ 2.42 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร เนื้อดินสูตรที่ 2 มีค่าความหนาแน่นประมาณ 2.54 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร หลังการเผาที่อุณหภูมิ 1,250 องศาเซลเซียส ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความหนาแน่นของเนื้อดินสูตรที่ 2 ในงานวิจัยนี้กับงานวิจัยของ Kara and Stevens (2002) ที่มีค่าความหนาแน่น 2.58 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตรพบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 4.14 ค่าความหนาแน่นของเนื้อดิน 2 สูตรหลังเผาที่อุณหภูมิ 800 – 1,250 องศาเซลเซียส

เนื้อดิน	อุณหภูมิการเผา (°C)					
	800	900	1000	1100	1200	1250
สูตรที่ 1	2.09 ± 0.01	2.10 ± 0.01	2.12 ± 0.01	2.08 ± 0.04	2.19 ± 0.01	2.42 ± 0.05
สูตรที่ 2	2.02 ± 0.03	2.07 ± 0.02	2.07 ± 0.04	2.05 ± 0.02	2.31 ± 0.03	2.54 ± 0.01



ภาพที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นของเนื้อดิน 2 สูตรกับการเผาที่อุณหภูมิ 800-1,250 องศาเซลเซียส

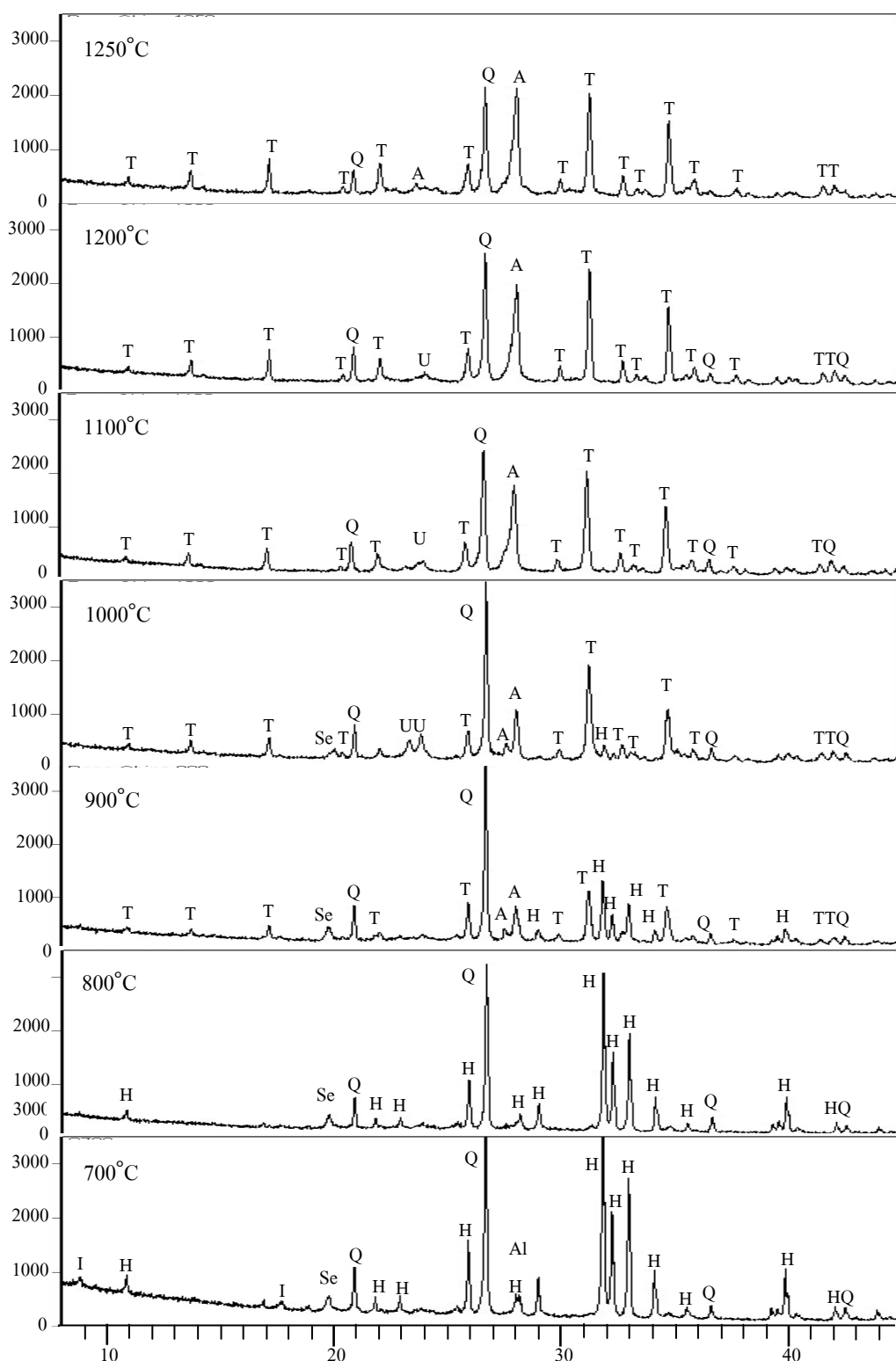
4.2.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึก

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของเนื้อดินโบนไชน่าของทั้ง 2 สูตร โดยศึกษาความเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างผลึกของเนื้อดินที่ผ่านการเผาอบพูนิกในช่วงอุณหภูมิ 700 – 1,250 องศาเซลเซียส การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกได้เพิ่มเติมเนื้อดินที่เผาอุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสเพื่อศึกษาการเปลี่ยนโครงสร้างผลึกได้ละเอียดขึ้น ผลการวิเคราะห์สำหรับเนื้อดินโบนไชน่าสูตรที่ 1 และสูตรที่ 2 แสดงไว้ดังภาพที่ 4.11 และ 4.12 ตามลำดับ

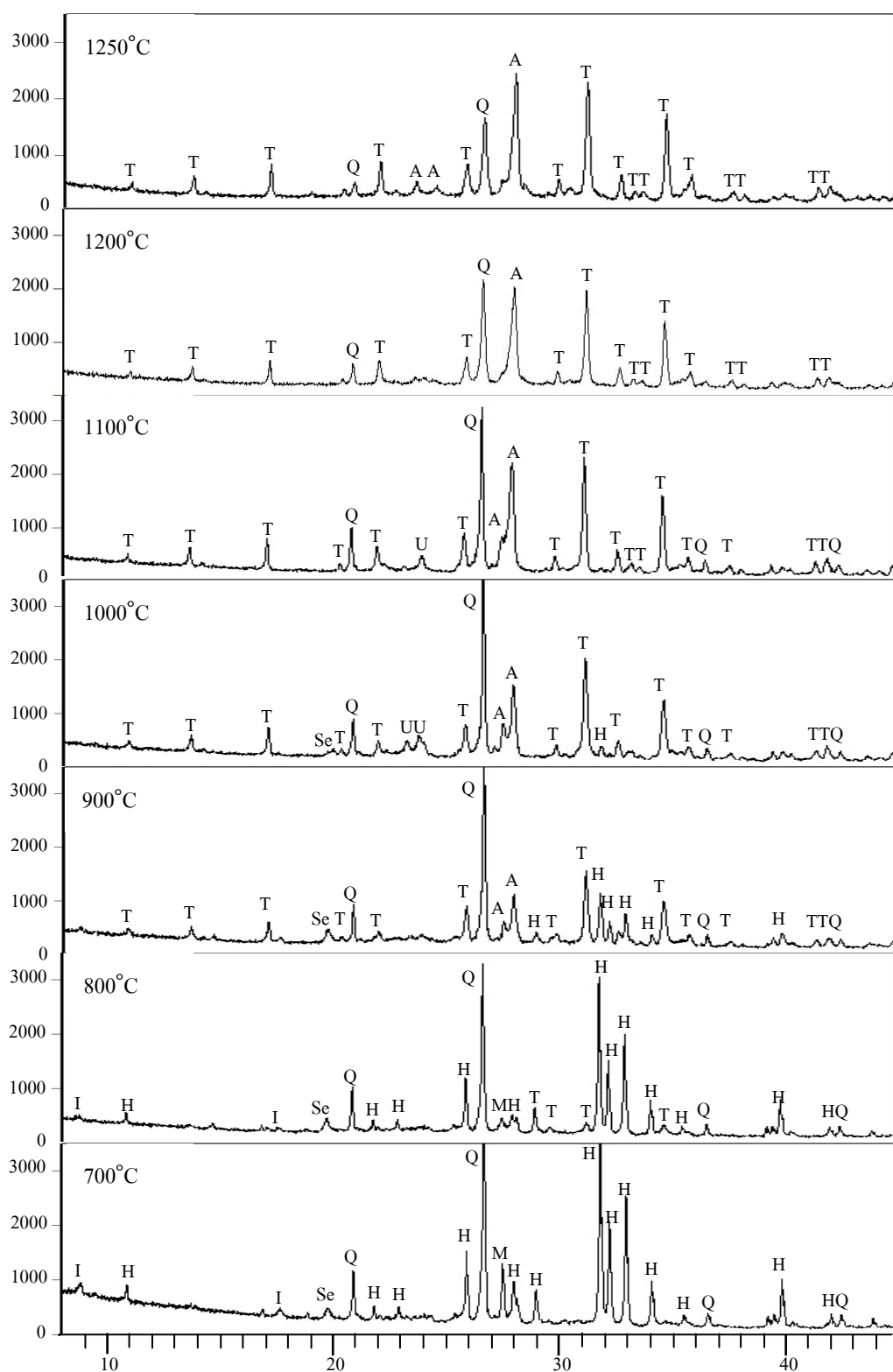
ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของชั้นทดสอบหลังการเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส พบว่าไม่ปรากฏฟิสิกของเคโอลิไนต์ในเนื้อดินทั้ง 2 สูตรแล้ว เนื่องจากเคโอลิไนต์ได้เปลี่ยน

โครงสร้างเป็นเมตะเคโอลินในช่วงอุณหภูมิ 450 - 600 องศาเซลเซียส (Lawrence, 1972) แต่พบฟิสิกเซอร์ไรต์ หลังเผาอุณหภูมิ 700 – 1,000 องศาเซลเซียส ซึ่งมาจากการเปลี่ยนแปลงของ เคโอลิไนต์ หรืออิลไลต์ (Wattanasiriwech et al., 2009) และหายไปหลังเผาที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส สำหรับไฮดรอกซีอะพาไทต์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2 \cdot 3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) ซึ่งมีองค์ประกอบของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) และฟอสฟอรัสเพนตะออกไซด์ (P_2O_5) เกิดเป็นไตรแคลเซียมฟอสเฟต ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) หลังเผาอุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ซึ่งจะปรากฏฟิสิกซ์ของไตรแคลเซียมฟอสเฟตที่มุมเลี้ยวเบน 2 θ ที่ 31 องศา ในเนื้อดินทั้ง 2 สูตร แต่ในสูตรที่ 2 ฟิสิกซ์ไตรแคลเซียมฟอสเฟตปรากฏชัดเจนกว่าในเนื้อดินสูตรที่ 1 อาจเป็นเพราะในเนื้อดินสูตรที่ 2 มีส่วนผสมของโพแทสเซียมเฟลด์สปาร์มากกว่าสูตรที่ 1 ซึ่งช่วยในการหลอม และในเนื้อดินปรากฏฟิสิกซ์ของอะนอร์ไทต์ที่มุมเลี้ยวเบน 2 θ ที่ 27.7 องศา อะนอร์ไทต์ ($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) เกิดจากการทำปฏิกิริยากันระหว่างแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ที่สลายจากแก้วกระดุกกับเมตะเคโอลิน ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) ซึ่งเกิดขึ้นหลังเผาที่ 900 องศาเซลเซียส ทั้งไตรแคลเซียมฟอสเฟต และอะนอร์ไทต์เกิดขึ้นหลังจากเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสซึ่งไม่ตรงกับงานวิจัยของ Roberts and Beech (1951) ที่ได้อธิบายกลไกการเกิดปฏิกิริยาของไฮดรอกซีอะพาไทต์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2 \cdot 3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) และแร่เคโอลิไนต์ ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)

แต่จากผลการวิเคราะห์ฟิสิกซ์ของไตรแคลเซียมฟอสเฟตกับฟิสิกซ์ของอะนอร์ไทต์เกิดการซ้อนทับกันจึงไม่สามารถระบุฟิสิกซ์ของอะนอร์ไทต์ได้อย่างชัดเจน หลังเผาอุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส พบว่าฟิสิกซ์ของไตรแคลเซียมฟอสเฟตในเนื้อดินทั้ง 2 สูตร ปรากฏชัดเจนขึ้น เนื่องจากแก้วกระดุกสลายตัวได้ดีขึ้นและสลายตัวหมดไปเมื่อเผาอุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิ 1,200 และ 1,250 ในเนื้อดินจะปรากฏเฉพาะฟิสิกซ์ของไตรแคลเซียมฟอสเฟต อะนอร์ไทต์ และควอดซ์เหมือนกันทั้ง 2 สูตร ที่มุมเลี้ยวเบน 2 θ ที่ 23 และ 24 องศา ปรากฏฟิสิกซ์ขึ้นหลังเผาที่อุณหภูมิ 1,000 และหายไปหลังเผาที่อุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียส ซึ่งคาดว่าเป็นฟิสิกซ์ที่มีองค์ประกอบของ CaO แต่ไม่สามารถระบุชนิดของผลึกได้



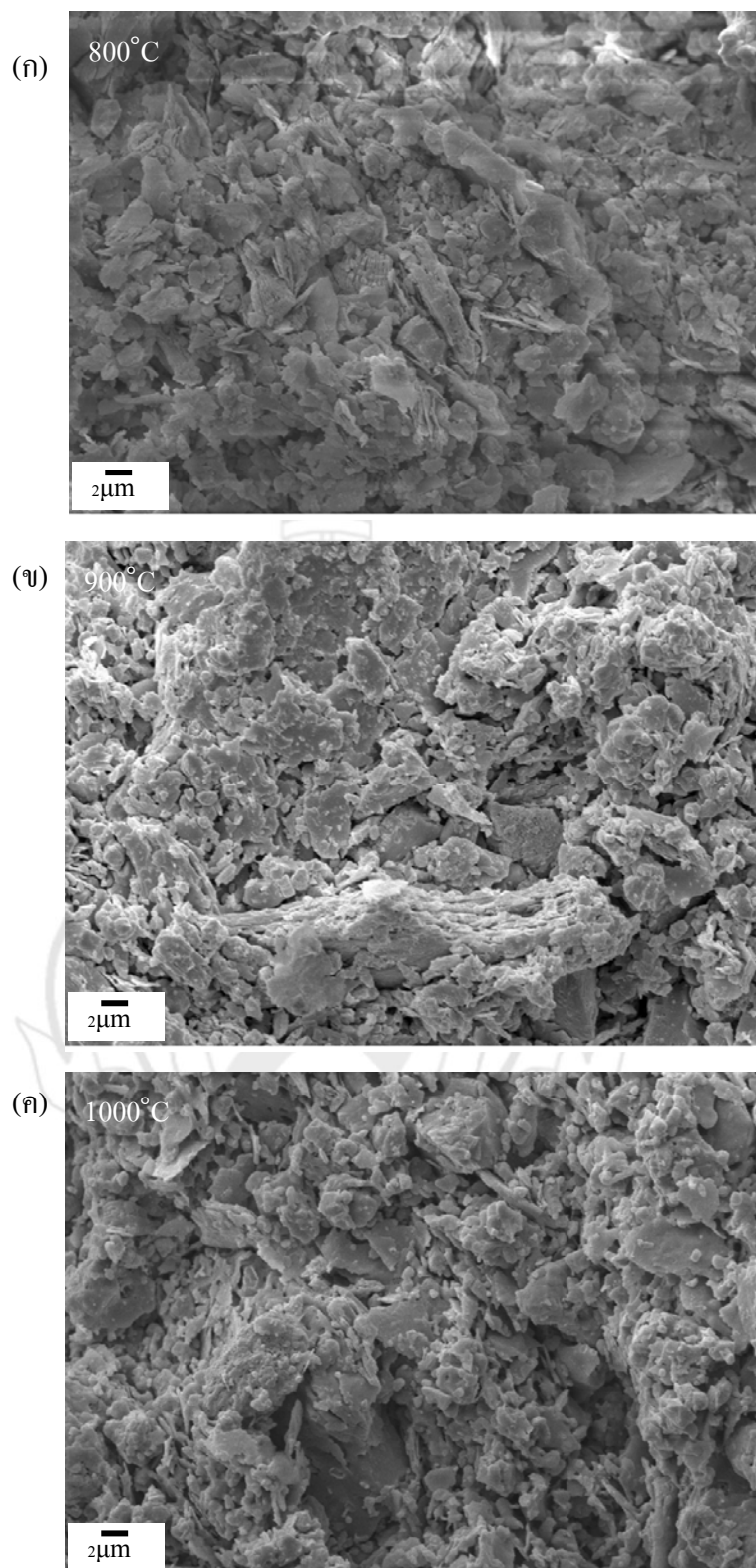
ภาพที่ 4.11 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกหลังเผาที่อุณหภูมิต่างๆของซินทอสบเนื้อดินโปน
 ใหนาสู่ตรที่ 1 (H=ไฮดรอกซีอะปาไทต์ ; T = ไตรแคลเซียมฟอสเฟต; Q= ควอตซ์;
 A=อะนอร์ไทต์; Al=อัลไบต์; Se = เซอริไซต์; U= มี Ca เป็นองค์ประกอบ



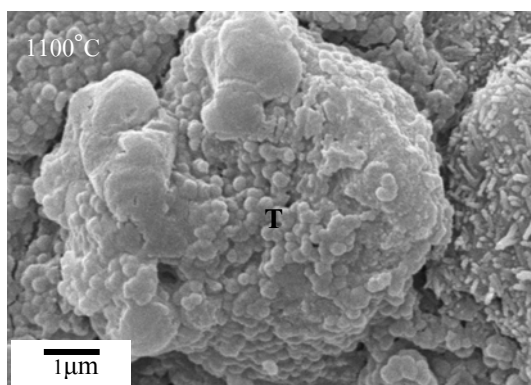
ภาพที่ 4.12 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกหลังเผาที่อุณหภูมิต่างๆของหินตอสน์เนื้อดินโบน
 ไซนา สูตรที่ 2 (H=ไฮดรอกซีอะปาไทต์; T = ไตรแคลเซียมฟอสเฟต; Q= ควอตซ์;
 A=อะนอร์ไทต์; M= ไมโครไคลน์; Al=อัลไบต์; Se = เซอริไซต์

4.2.3 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค

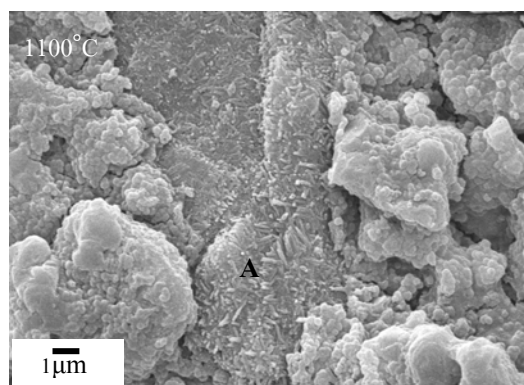
ภาพที่ 4.13 - 4.16 แสดงผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคของหินทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของเนื้อดินสูตรที่ 1 หลังเผาที่อุณหภูมิ 800 -1,250 องศาเซลเซียส ซึ่งภาพที่ 4.13 (ก) - (ค) และ 4.17 (ก) - (ค) ศึกษาจากลักษณะพื้นผิวหลังการหัก (Fractural surface) ซึ่งโครงสร้างทางจุลภาคของตัวอย่างหลังเผาที่อุณหภูมิ 800-1,000 องศาเซลเซียส ลักษณะของเนื้อดินยังไม่มีมีความแตกต่างกันมากซึ่งสอดคล้องกับผลความพรุนตัวของเนื้อดินในสูตรที่ 1 แต่หลังจากเผาที่อุณหภูมิ 1,100 -1,250 องศาเซลเซียส (ภาพที่ 4.10 - 4.12) หินทดสอบผ่านการขัด และกัดผิวด้วยกรด HF ความเข้มข้น 4 เปอร์เซ็นต์ พบว่ามีผลึกของไตรแคลเซียมฟอสเฟต (T) และอะนอร์ไทต์ (A) ซึ่งมีผลสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD คือที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส ไม่พบผลึกของไฮดรอกซีอะปาทาइटเนื่องจากไฮดรอกซีอะปาทาइटได้สลายไปหมดแล้วที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส ผลึกไตรแคลเซียมฟอสเฟตจะเป็นผลึกกลมซึ่งผลึกดังกล่าวเกิดจากการทำปฏิกิริยากันระหว่างแคลเซียมออกไซด์ และฟอสฟอรัสเพนตะออกไซด์ซึ่งมาจากการสลายตัวของไฮดรอกซีอะปาทาइट ดังแสดงในสมการที่ 2.1 ผลึกอะนอร์ไทต์จะเป็นแท่งยาวซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยากันระหว่าง แคลเซียมออกไซด์และเมตะเคโอลิน ซึ่งเกิดจากการสลายตัวของไฮดรอกซีอะปาทาइट และเคโอลินลำดับ ซึ่งแสดงในสมการ 2.2 ซึ่งสามารถยืนยันได้จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค EDS เพื่อเป็นการวิเคราะห์เฉพาะจุดผลในภาพที่ 4.21 (ก) แสดงผลึกของไตรแคลเซียมฟอสเฟต ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) มีองค์ประกอบหลักคือ แคลเซียม (Ca) และ ฟอสฟอรัส (P) นอกจากนั้นยังพบองค์ประกอบของ ซิลิกอน (Si) อลูมิเนียม (Al) โพแทสเซียม (K) แมกนีเซียม (Mg) และ ฟลูออรีน (F) ซึ่งเชื่อว่า Si และ Al เป็นสิ่งปนเปื้อนที่เกิดจากการเผาและเถ้ากระดูกที่ผ่านการบด ส่วน K Mg และ F เป็นสิ่งปนเปื้อนตามธรรมชาติอยู่ในพื้นที่ที่ใกล้เคียงกับผลึกที่ต้องการวิเคราะห์ (Kara & Stevens, 2002a) ซึ่งในภาพที่ 4.21(ข) แสดงผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS พบว่าผลึกของอะนอร์ไทต์ ($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) มีองค์ประกอบหลักคือ Al, Si และ Ca นอกจากนั้นประกอบด้วย P และ K ซึ่งน่าจะมาจากพื้นที่ใกล้เคียงกับผลึกที่วิเคราะห์ (Kara & Stevens, 2002b) เมื่อเปรียบเทียบผลึกที่เกิดขึ้นในเนื้อดินสูตรที่ 2 มีลักษณะเดียวกับสูตรที่ 1 แต่พบว่าหลังเผาอบผนังที่อุณหภูมิ 1,200 และ 1,250 องศาเซลเซียส ในภาพที่ 4.19 และ 4.20 ตามลำดับ ผลึกไตรแคลเซียมฟอสเฟตจะโตกว่าสูตรที่ 1 ที่อุณหภูมิเดียวกันดังแสดงในภาพที่ 4.15 และ 4.16 ทั้งนี้สามารถอธิบายได้ว่าในสูตรที่ 2 ซึ่งเป็นสูตรที่เติมโพแทสเซียมเฟลด์สปาร์ซึ่งจะเป็นตัวที่เพิ่มของเหลวในเนื้อดินและช่วยให้การโตของผลึกโตได้ดีขึ้น



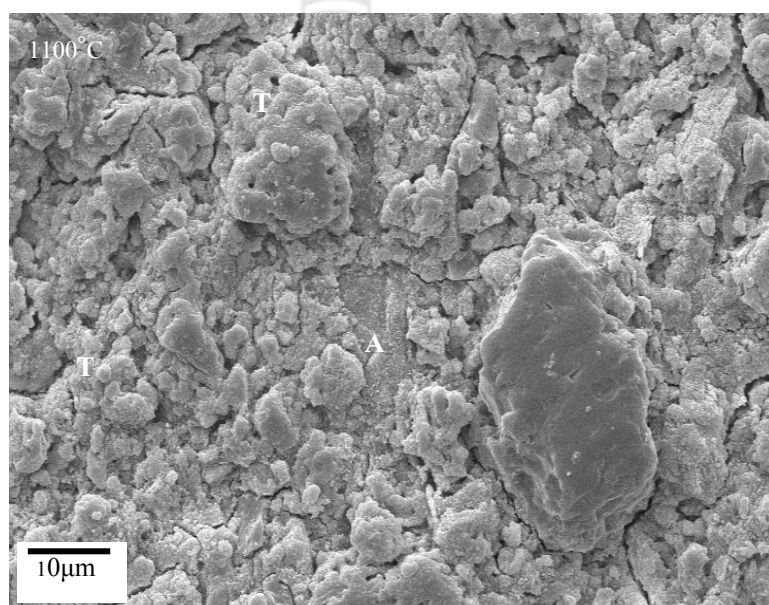
ภาพที่ 4.13 ลักษณะพื้นผิวการแตกหักหลังเผาที่อุณหภูมิ 800-1,000 องศาเซลเซียส
ของตัวอย่างเนื้อดินโบนไชน่าสูตรที่ 1



(ก)

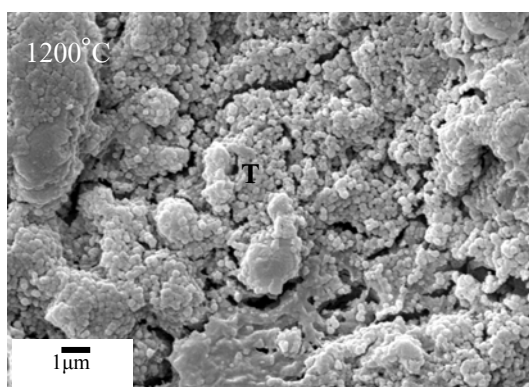


(ข)

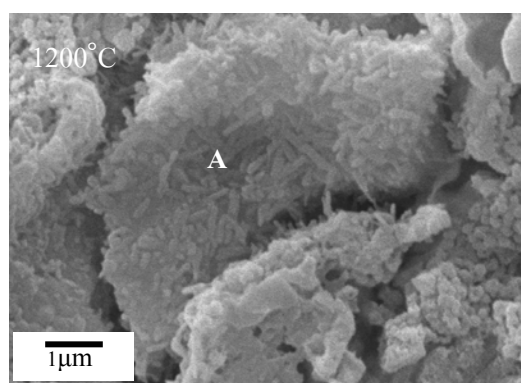


(ค)

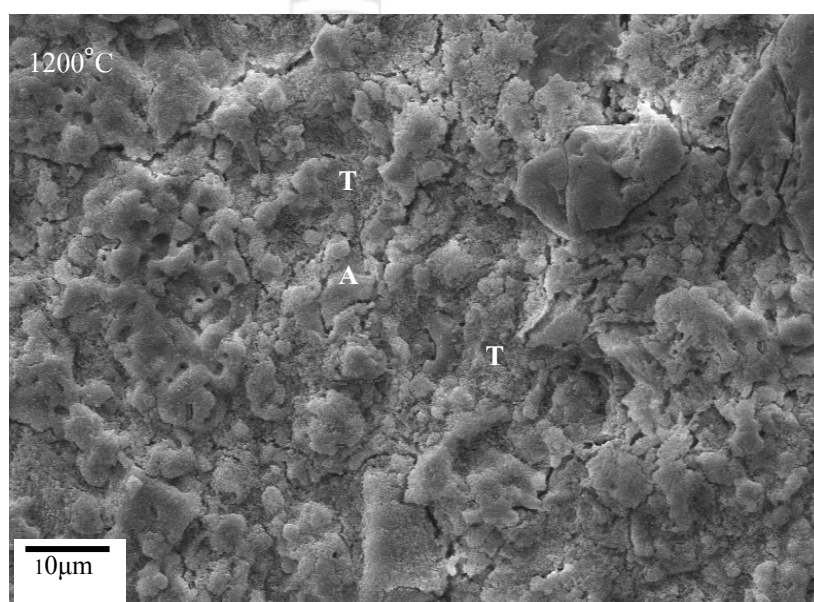
ภาพที่ 4.14 ตัวอย่างเนื้อดินสูตรที่ 1 หลังเผาที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส แสดงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงาน (ก) ไตรแคลเซียมฟอสเฟต(T) (ข) อะนอร์ไทต์(A) และ (ค) โครงสร้างทางจุลภาคโดยรวม



(ก)

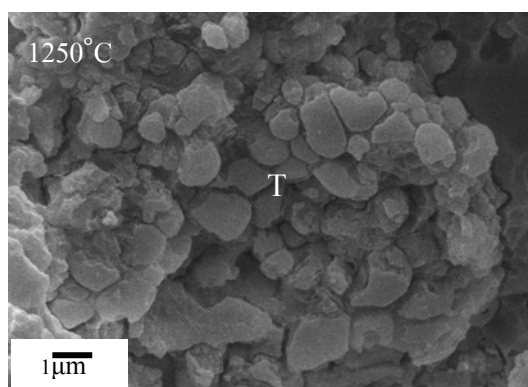


(ข)

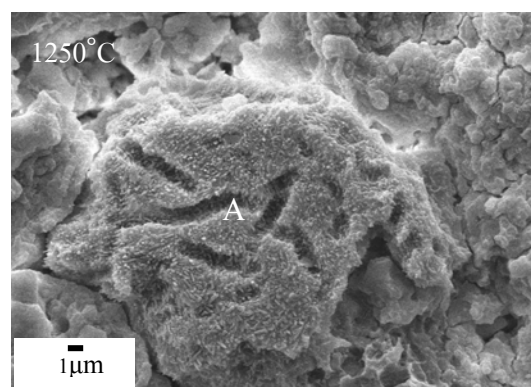


(ค)

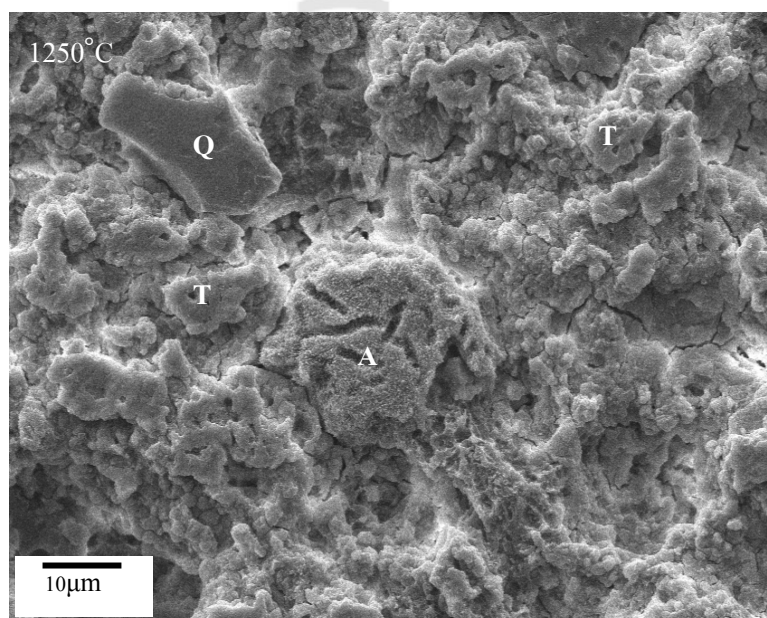
ภาพที่ 4.15 ตัวอย่างเนื้อดินสูตรที่ 1 หลังเผาที่อุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียส แสดงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงาน (ก) ไตรแคลเซียมฟอสเฟต (T) (ข) อะนอร์ไทต์ (A) และ (ค) โครงสร้างทางจุลภาคโดยรวม



(ก)

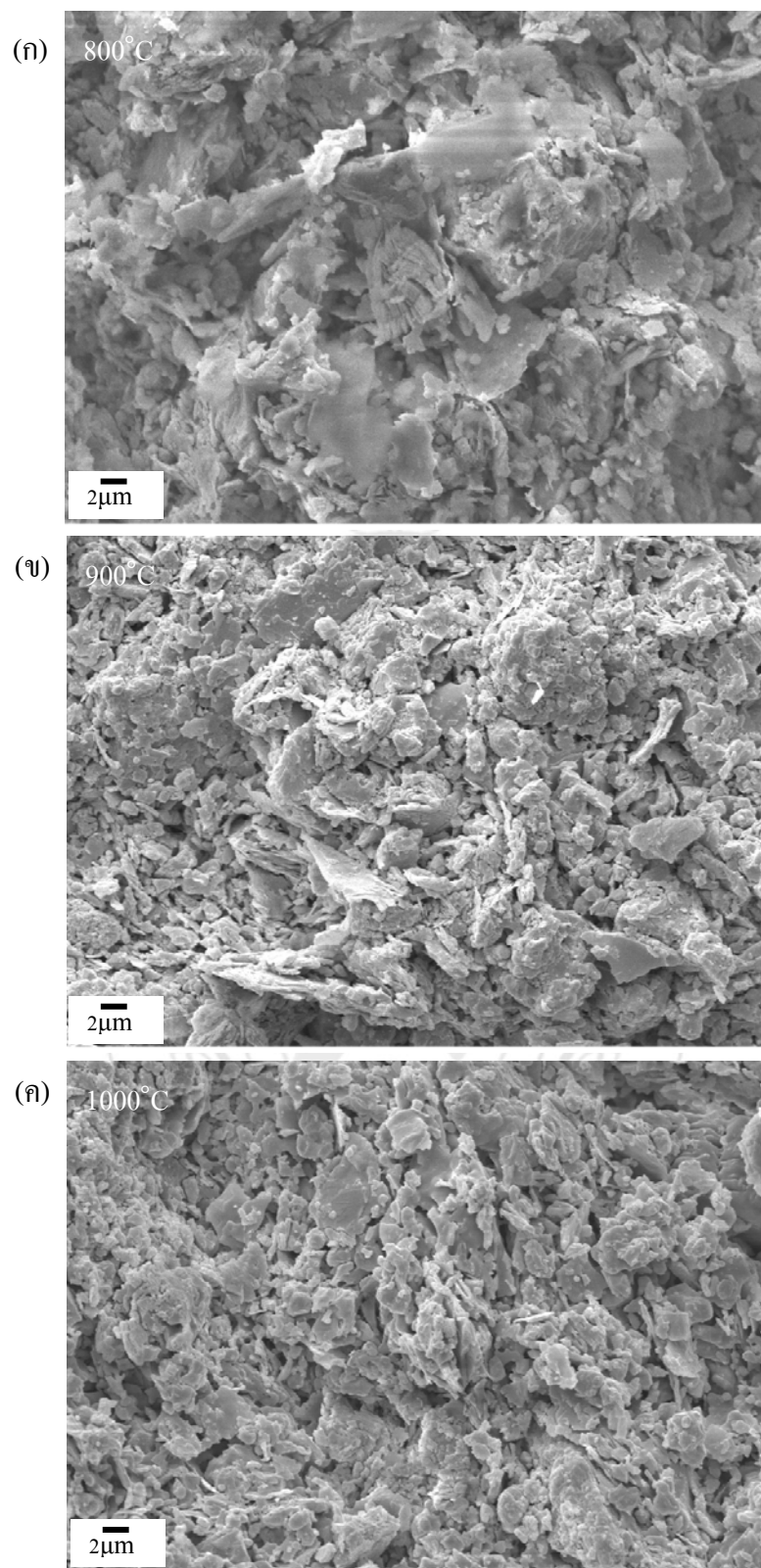


(ข)

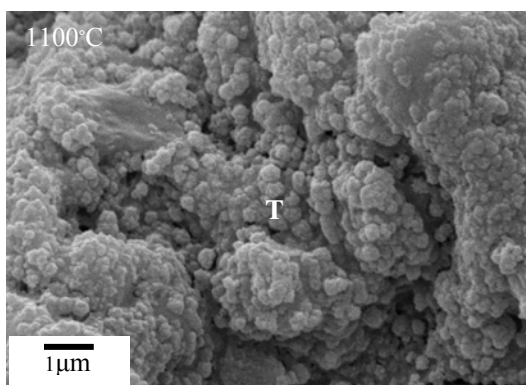


(ค)

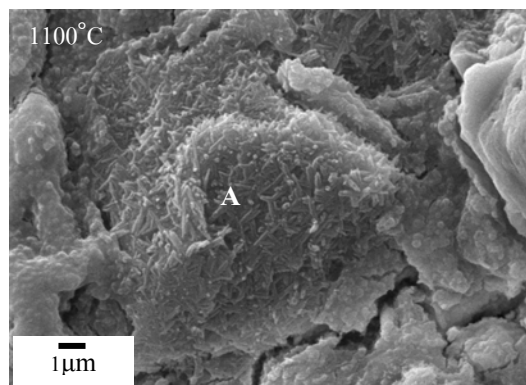
ภาพที่ 4.16 ตัวอย่างเนื้อดินสูตรที่ 1 หลังเผาที่อุณหภูมิ 1,250 องศาเซลเซียสแสดงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงาน (ก) ไตรแคลเซียมฟอสเฟต (T) (ข) อะนอร์ไทต์ (A) และ (ค) โครงสร้างทางจุลภาคโดยรวม



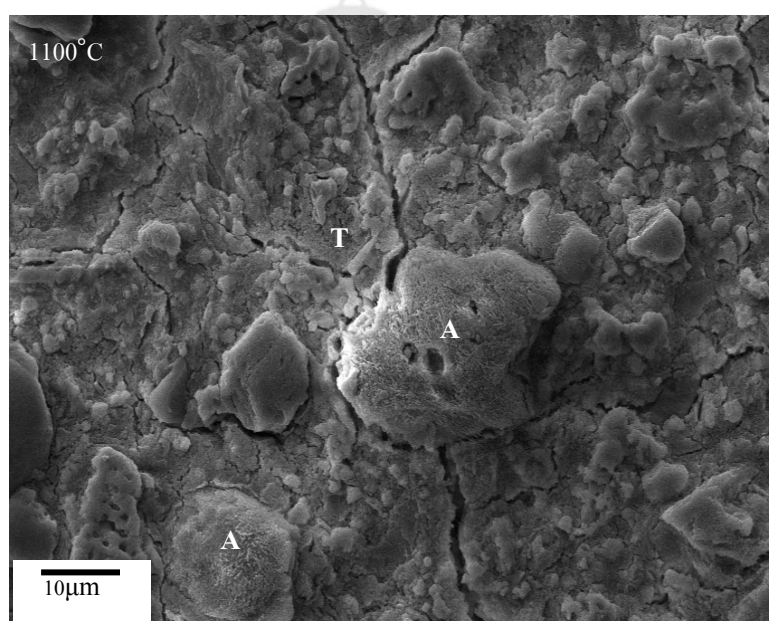
ภาพที่ 4.17 ลักษณะของพื้นผิวการแตกหักของตัวอย่างเนื้อดินโบนไชน่าสูตรที่ 2
หลังเผาที่อุณหภูมิ 800 -1,000 องศาเซลเซียส



(ก)

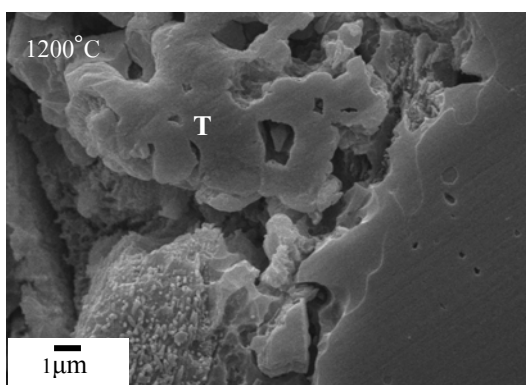


(ข)

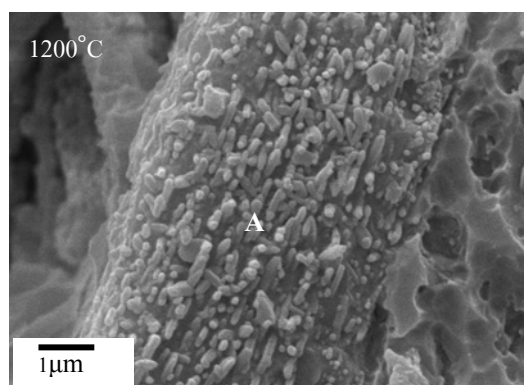


(ค)

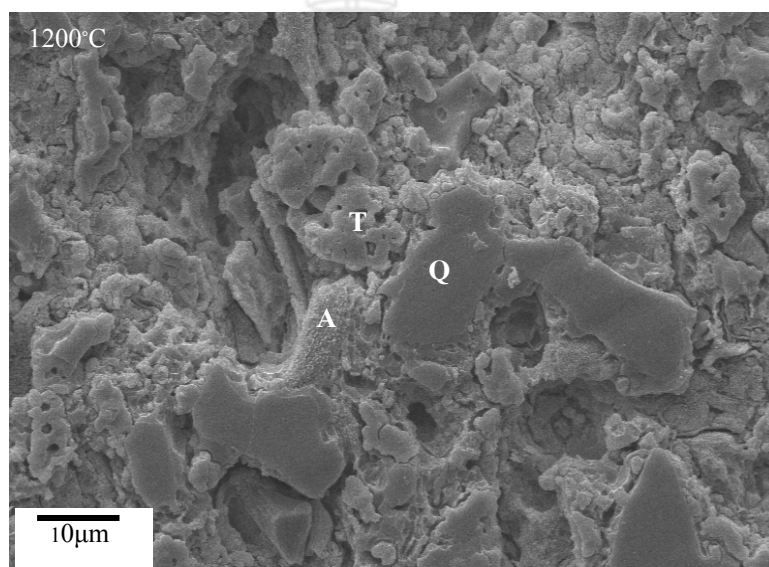
ภาพที่ 4.18 ตัวอย่างเนื้อดินสูตรที่ 2 หลังเผาที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียสแสดงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงาน (ก) ไตรแคลเซียมฟอสเฟต (T) (ข) อะนอร์ไทต์ (A) และ (ค) โครงสร้างทางจุลภาคโดยรวม



(ก)

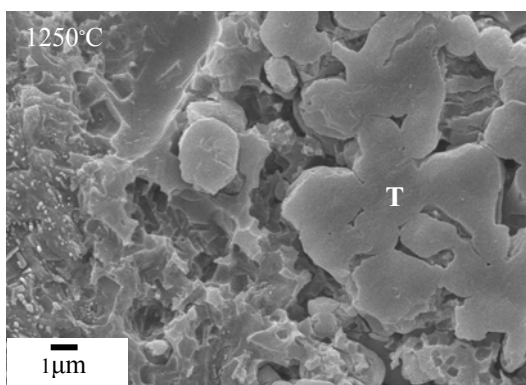


(ข)

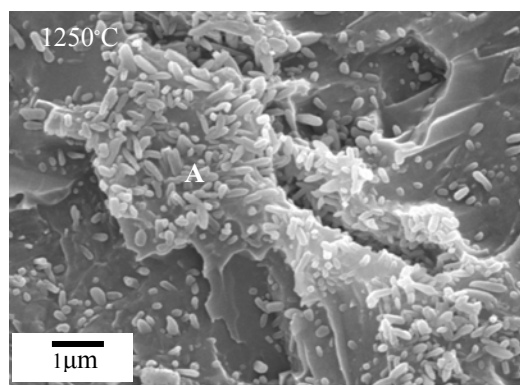


(ค)

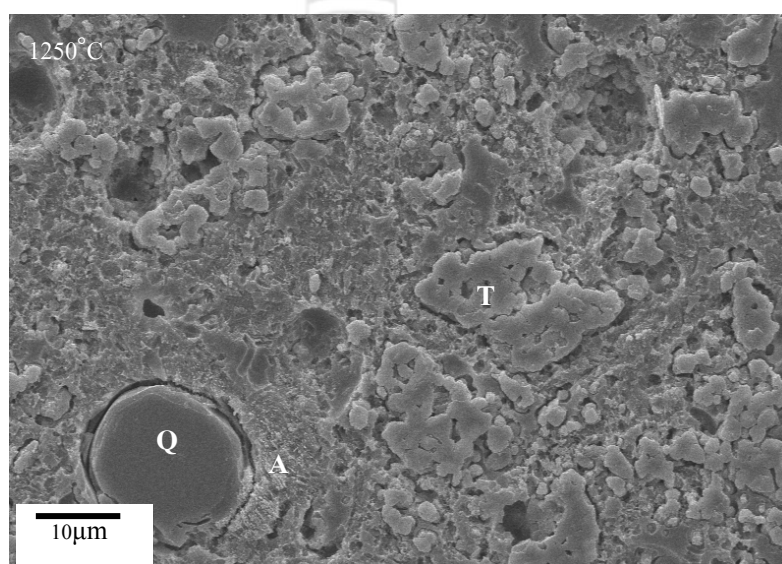
ภาพที่ 4.19 ตัวอย่างเนื้อดินสูตรที่ 2 หลังเผาที่อุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียสแสดงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงาน (ก) ไตรแคลเซียมฟอสเฟต (T) (ข) อะนอร์ไทต์ (A) และ (ค) โครงสร้างทางจุลภาคโดยรวม



(ก)



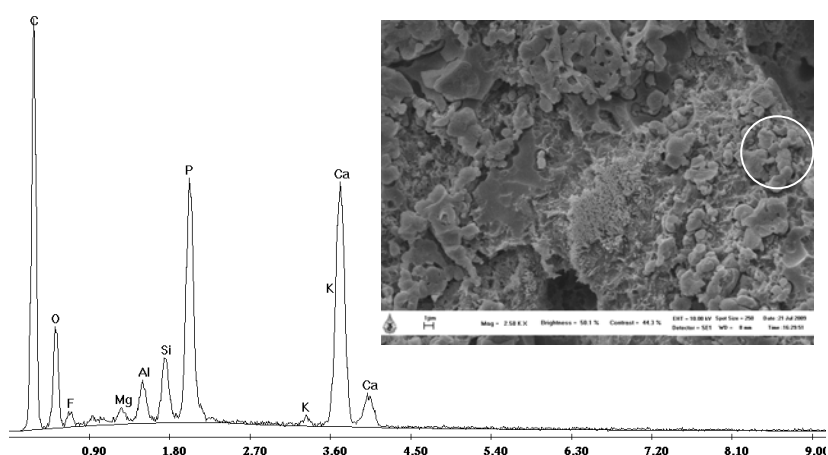
(ข)



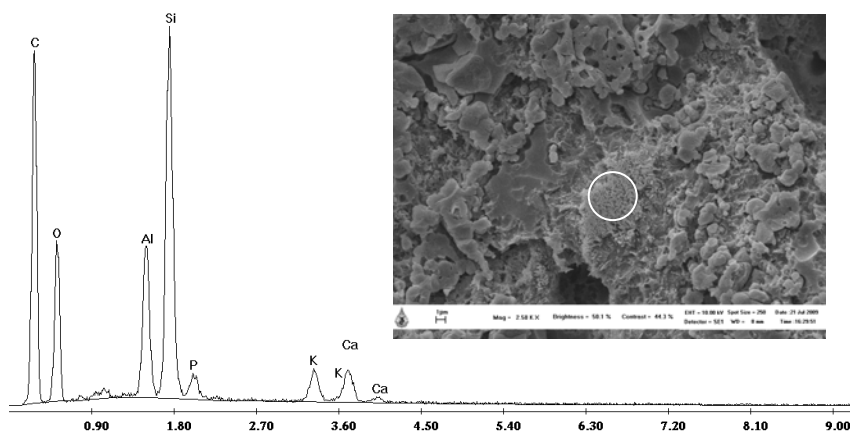
(ค)

ภาพที่ 4.20 ตัวอย่างเนื้อดินสูตรที่ 2 หลังเผาที่อุณหภูมิ 1,250 องศาเซลเซียสแสดงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงาน (ก) ไตรแคลเซียมฟอสเฟต (T) (ข) อะนอนไรท์ (A) และ (ค) โครงสร้างทางจุลภาคโดยรวม

(ก) ผลึกไตรแคลเซียมฟอสเฟต ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$)



(ข) ผลึกอะนอร์ไทต์ ($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$)



ภาพที่ 4.21 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี (EDS) ของผลึกไตรแคลเซียมฟอสเฟต และผลึกอะนอร์ไทต์ ของชิ้นงานสูตรที่ 2 หลังเผาที่อุณหภูมิ 1,250 องศาเซลเซียส

4.3 ผลการทดลองขั้นตอนที่ 3

เป็นการนำเนื้อดินที่เลือกจากการทดลองที่ 2 เพื่อทดสอบหาอุณหภูมิที่เหมาะสมกับเนื้อดิน และนำมาทดสอบเพิ่มเกี่ยวกับสมบัติเชิงกล ความโปร่งแสง และสี

การพิจารณาเบื้องต้นจากสมบัติทางกายภาพ เนื้อดินทั้ง 2 สูตร คือ สูตรที่ 1 มีอัตราส่วนผสมมาตรฐานและสูตรที่ 2 มีอัตราส่วนผสมมาตรฐานและเติมโพแทสเซียมเฟลด์สปาร์ หลังเผาที่อุณหภูมิ 800 – 1,250 องศาเซลเซียสในขั้นตอนที่ 2 ผลปรากฏว่าเนื้อดินสูตรที่ 2 มีสมบัติใกล้เคียงกับโบนไฮน้าที่ใช้หินคอร์นิชเป็นส่วนผสม มากกว่าเนื้อดินสูตรที่ 1 ในขั้นตอนนี้ผู้วิจัยจึงสนใจจะศึกษาผลของการเผาอบผนังที่ 1,220 – 1,250 องศาเซลเซียส เนื่องจากเนื้อดินโบนไฮน้ามีการสุกตัวในช่วงแคบโดยปกติแล้วจะอยู่ในช่วง 15-25 องศาเซลเซียส (Kara & Stevens., 2002a) ในขั้นตอนนี้ผู้วิจัยได้ศึกษาสมบัติทางกายภาพและศึกษาการเปลี่ยนแปลงเฟสเช่นเดียวกันกับขั้นตอนที่ 2 และทดสอบสมบัติอื่นๆที่พึงประสงค์ของเนื้อดินชนิดนี้ได้แก่ ความขาว ความโปร่งแสง ความแข็งแรง และการต้านทานการแตกร้าว การเตรียมชิ้นทดสอบในขั้นตอนนี้จะเลือกใช้เนื้อดินสูตรที่ 2 ซึ่งมีอัตราส่วนผสมของเถ้ากระดูก ดินขาว หินผุ และโพแทสเซียมเฟลด์สปาร์ ดังตารางที่ 3.1

ผลการศึกษาสมบัติทางกายภาพของชิ้นทดสอบของเนื้อดินโบนไฮน้าสูตรที่ 2 คือสูตรมาตรฐานที่เติมโพแทสเซียมเฟลด์สปาร์ หลังเผาที่อุณหภูมิ 1,220 – 1,250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แสดงในตารางที่ 4.4 นำสมบัติทางกายภาพ คือ ค่าการหดตัว ค่าการดูดซึมน้ำ ค่าความพรุนตัว ค่าความหนาแน่น สมบัติเชิงกล คือ ค่าความแข็งแรง และค่าความต้านทานการแตกร้าวนำมาสร้างกราฟเทียบกับอุณหภูมิการเผาอบผนังกราฟจะแสดงไว้ในภาพที่ 4.22 – 4.26 ผลการวิเคราะห์ความขาวแสดงไว้ในตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์ความโปร่งแสงแสดงไว้ในภาพที่ 4.26 สำหรับผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกและผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคผลจะแสดงไว้ในภาพที่ 4.29 -4.33

4.3.1 ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพ

ผลการศึกษาสมบัติทางกายภาพของชิ้นทดสอบเนื้อดินโบนไฮน้าสูตรที่ 2 หลังเผาที่อุณหภูมิ 1,220 – 1,250 องศาเซลเซียส เมื่อนำค่าการหดตัว ค่าการดูดซึมน้ำ ค่าความพรุนตัวปรากฏ และค่าความหนาแน่นนำมาสร้างกราฟกับอุณหภูมิการเผาอบผนังซึ่งแสดงไว้ในภาพที่ 4.22-4.25 สามารถอธิบายได้ว่าเมื่ออุณหภูมิการเผาเพิ่มขึ้นค่าการหดตัวจะเพิ่มมากขึ้นซึ่งหมายความว่าช่องว่าง

ระหว่างอนุภาคลดลงซึ่งค่าการหดตัวที่อุณหภูมิสูงสุดคือ 13.14 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 1,250 องศาเซลเซียส ซึ่งค่าการหดตัวก็จะมีความสัมพันธ์กับค่าความพรุนตัวปรากฏคือค่าการหดตัวสูงทำให้ค่าความพรุนตัวต่ำลง ค่าความพรุนตัวปรากฏในงานวิจัยนี้มีค่าประมาณ 0.07 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่าน้อยกว่างานวิจัยของ Kara and Stevens (2002) ที่มีค่าเท่ากับหรือน้อยกว่า 0.5 เปอร์เซ็นต์ ค่าการดูดซึมน้ำมีค่าประมาณ 0.03 เปอร์เซ็นต์ซึ่งค่าการดูดซึมน้ำก็จะมีความสัมพันธ์ค่าความหนาแน่นคือความหนาแน่นสูงค่าการดูดซึมน้ำจะต่ำ ค่าความหนาแน่นในงานวิจัยนี้มีค่าใกล้เคียงกันถึงแม้จะเผาอุณหภูมิต่างกันอาจเนื่องมาจากเนื้อดินหลอมตัวเป็นเนื้อแก้วและเกิดเฟสขึ้นภายในเนื้อดินและการโตของเฟสจะช่วยลดช่องว่างหรือรูพรุนทำให้มีความหนาแน่นมากขึ้น (Norton, 1973) ซึ่งสามารถดูการโตของเฟสได้ในรูปที่ 4.30-4.33 และค่าความหนาแน่นที่มากที่สุดคือประมาณ 2.54 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Kara and Stevens (2002a) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 2.58 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

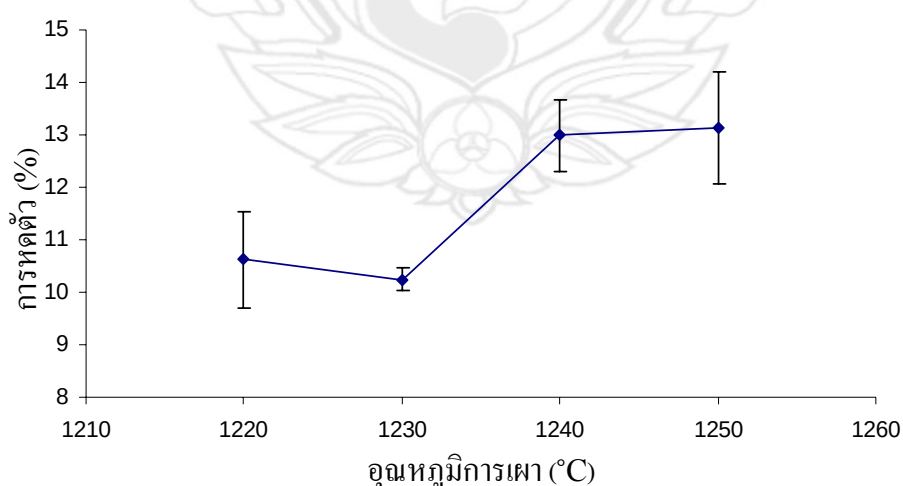


4.3.1.1 ผลการทดลองค่าการหดตัว

ผลการศึกษาค่าการหดตัวของเนื้อดินสูตรที่ 2 คือสูตรมาตรฐานเดิมโพแทสเซียมเฟลด์สปาร์ลงไป 10 เปอร์เซ็นต์ หลังเผาอบพูนิกที่อุณหภูมิ 1,220 – 1,250 องศาเซลเซียส ซึ่งห่างกันช่วงละ 10 องศาเซลเซียส ผลแสดงไว้ดังภาพที่ 4.22 พบว่าที่อุณหภูมิ 1,220 และ 1,230 องศาเซลเซียส มีค่าการหดตัวที่ไม่แตกต่างกัน หลังจากเผาอบพูนิกที่อุณหภูมิ 1,230 องศาเซลเซียสเริ่มมีการหดตัว จนถึงการเผาอบพูนิกที่อุณหภูมิ 1,240 และ 1,250 องศาเซลเซียส จะเห็นว่าค่าการหดตัวเพิ่มขึ้นแต่ไม่มีความแตกต่าง การหดตัวของเนื้อดินเกิดจากตัวหลอมละลายคือ หินผุและโพแทสเซียมเฟลด์สปาร์ ที่เป็นส่วนผสมในเนื้อดินเกิดการหลอมและเปลี่ยนเป็นของเหลวซึ่งช่วยให้อนุภาคเคลื่อนที่ชิดกันทำให้ช่องว่างระหว่างอนุภาคลดลงจึงทำให้เกิดการหดตัว และค่าการหดตัวที่ไม่มีความแตกต่างกันที่อุณหภูมิ 1,240 และ 1,250 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.15 ค่าการหดตัวของเนื้อดินหลังเผาที่อุณหภูมิ 1,220 – 1,250 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิ (°C)	1220	1230	1240	1250
การหดตัว (%)	10.62 ± 0.92	10.24 ± 0.21	12.99 ± 0.69	13.14 ± 1.07



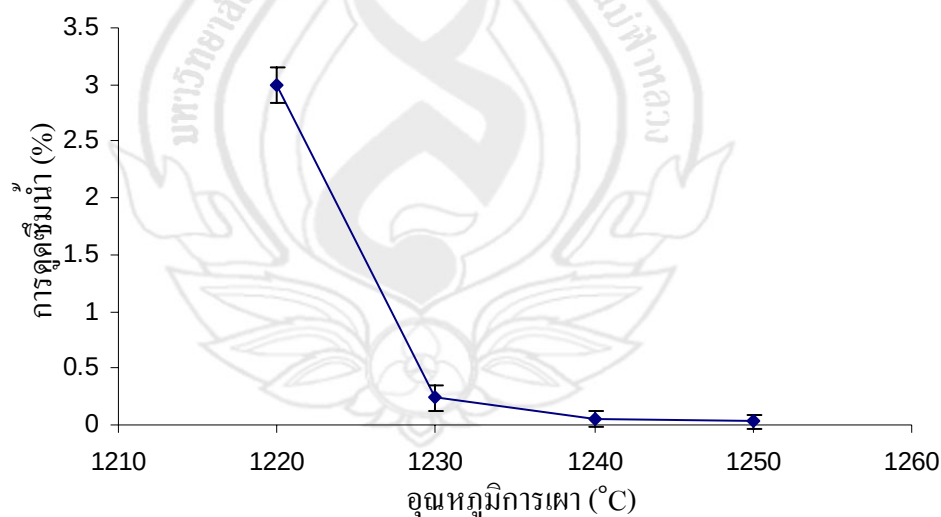
ภาพที่ 4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการหดตัวของเนื้อดินสูตรที่ 2 กับการเผาที่อุณหภูมิ 1,220 – 1,250 องศาเซลเซียส

4.3.1.2 ผลการทดลองค่าการดูดซึมน้ำ

ผลการศึกษาค่าการดูดซึมน้ำของเนื้อดินโบนไชนาสู่สูตรที่ 2 หลังการเผาอบผืนที่อุณหภูมิ 1,220 – 1,250 องศาเซลเซียส แสดงไว้ในภาพที่ 4.23 พบว่าการดูดซึมน้ำที่อุณหภูมิ 1,220 องศาเซลเซียส ยังมีค่าสูง คือ 3 เปอร์เซ็นต์ แต่หลังเผาที่อุณหภูมิ 1,230 - 1,250 องศาเซลเซียส ค่าการดูดซึมน้ำลดน้อยลงและมีค่าไม่แตกต่างกันซึ่งทั้ง 3 อุณหภูมิมีค่าการดูดซึมน้ำอยู่ในช่วงค่าการดูดซึมน้ำของเนื้อดินโบนไชนาซึ่งมีค่าน้อยกว่า 2 เปอร์เซ็นต์ (McColm., 1994) การดูดซึมน้ำมีความสัมพันธ์กับค่าการหดตัวเมื่อเผาอุณหภูมิสูงขึ้นช่องว่างระหว่างอนุภาคลดน้อยลง

ตารางที่ 4.16 ค่าการหดตัวของเนื้อดินหลังเผาที่อุณหภูมิ 1,220 – 1,250 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิ (°C)	1220	1230	1240	1250
การดูดซึมน้ำ (%)	3.00 ± 0.16	0.24 ± 0.11	0.05 ± 0.07	0.03 ± 0.06



ภาพที่ 4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการการดูดซึมน้ำของเนื้อดินสูตรที่ 2 กับการเผาที่อุณหภูมิ 1,220 – 1,250 องศาเซลเซียส

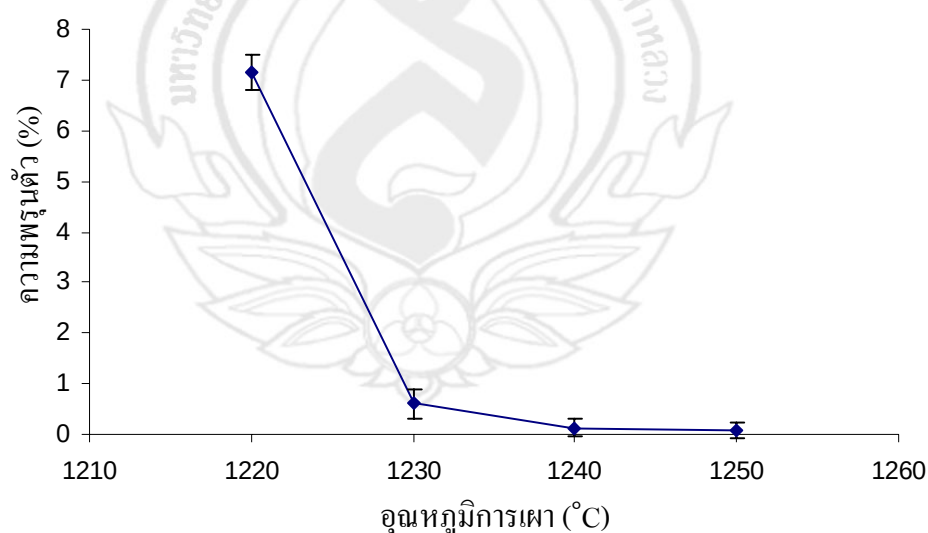
4.3.1.3 ผลการทดลองค่าความพรุนตัวปรากฏ

ผลการศึกษาค่าความพรุนตัวปรากฏของเนื้อดินโบนไชน่าสูตรที่ 2 หลังเผาที่อุณหภูมิ 1,220 - 1,250 องศาเซลเซียส แสดงไว้ดังภาพที่ 4.24 พบว่าความพรุนตัวที่อุณหภูมิ 1,220 องศาเซลเซียสมีค่าประมาณ 7 เปอร์เซ็นต์ และมีค่าความพรุนตัวลดลงที่อุณหภูมิ 1,230 - 1,250 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วงเดียวกับเนื้อดินโบนไชน่าจากการศึกษาของ Kara and Stevens (2002a) คือน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.5 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งค่าความพรุนตัวปรากฏมีความสัมพันธ์กับความหนาแน่นเนื่องจากพรุนเปิดลดน้อยลง

ตารางที่ 4.17 ค่าความพรุนตัวปรากฏของเนื้อดินหลังเผาที่อุณหภูมิ

1,220 – 1,250 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิ (°C)	1220	1230	1240	1250
ความพรุนตัวปรากฏ (%)	7.16 ± 0.34	0.60 ± 0.28	0.13 ± 0.18	0.07 ± 0.15



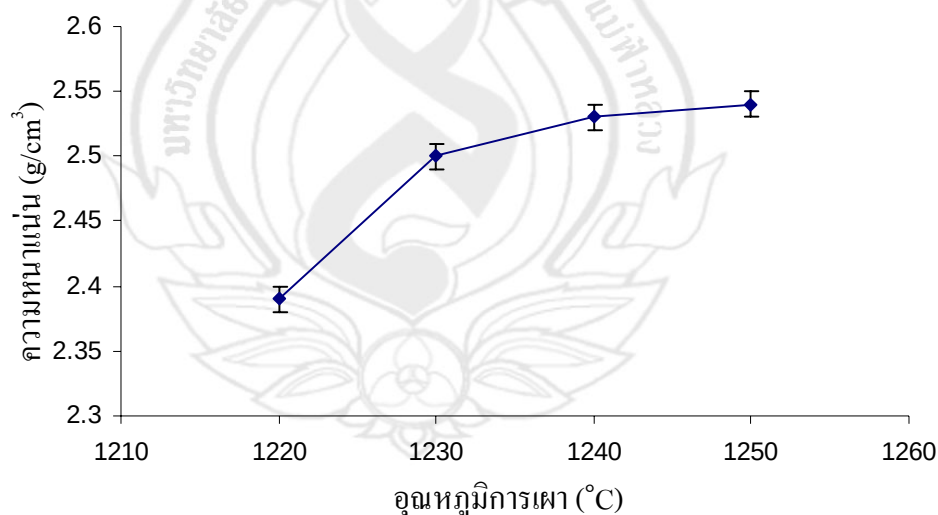
ภาพที่ 4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความพรุนตัวของเนื้อดินสูตรที่ 2 กับการเผาที่อุณหภูมิ 1,220 – 1,250 องศาเซลเซียส

4.3.1.4 ผลการทดลองค่าความหนาแน่น

ผลการศึกษาค่าความหนาแน่นของเนื้อดินโบนไฮนาสูตรที่ 2 หลังเผาอบผึ่งที่อุณหภูมิ 1,220 -1,250 องศาเซลเซียส แสดงในภาพที่ 4.25 พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้นด้วย หลังเผาที่อุณหภูมิ 1,230 -1,250 องศาเซลเซียส มีค่าความหนาแน่นที่ใกล้เคียงกัน แต่ค่าความหนาแน่นสูงสุดคือ 2.54 หลังเผาที่อุณหภูมิ 1,250 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Kara and Stevens (2002b) ซึ่งมีค่าความหนาแน่น 2.58 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ค่าความหนาแน่นสูงเมื่อค่าการดูดซึมน้ำน้อยลงเพราะช่องว่างระหว่างอนุภาคดินน้อยลง

ตารางที่ 4.18 ค่าความหนาแน่นของเนื้อดินหลังเผาที่อุณหภูมิ 1,220 – 1,250 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิ (°C)	1220	1230	1240	1250
ความหนาแน่น (g/cm ³)	2.32 ± 0.01	2.50 ± 0.01	2.53 ± 0.01	2.54 ± 0.01



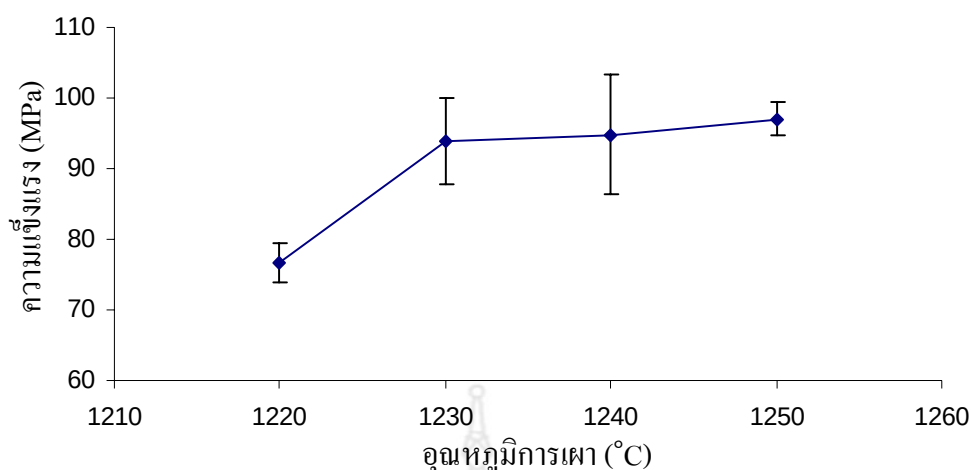
ภาพที่ 4.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นของเนื้อดินสูตรที่ 2 กับการเผาที่อุณหภูมิ 1,220 – 1,250 องศาเซลเซียส

4.3.1.5 ผลการทดลองค่าความแข็งแรง

ผลการศึกษาความแข็งแรงจากการหักงอ (Flexural strength) ของชิ้นทดสอบหลังการเผาอบผนังที่อุณหภูมิ 1,220 – 1,250 องศาเซลเซียส โดยกราฟจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงในการหักงอกับอุณหภูมิในการเผาอบผนัง แสดงไว้ในภาพที่ 4.26 จากการศึกษาพบว่าค่าความแข็งแรงจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการเผา แต่ค่าความแข็งแรงหลังจากการเผาอบผนังที่อุณหภูมิ 1,230 – 1,250 องศาเซลเซียสจะมีค่าที่อยู่ในช่วงเดียวกัน ค่าความแข็งแรงที่สูงที่สุดมีค่าประมาณ 97.08 เมกะปาสคาลหลังเผาอุณหภูมิ 1,250 องศาเซลเซียส ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าเมื่ออุณหภูมิการเผาเพิ่มขึ้นจะช่วยลดครุพูนที่เป็นสาเหตุของการลดความแข็งแรงซึ่งสอดคล้องกับความหนาแน่นเช่นกัน และเนื่องจากภายในเนื้อดินมีผลึกของไตรแคลเซียมฟอสเฟต ผลึกอะโนไรไทต์ และแก้วอยู่ด้วยจึงทำให้ความแข็งแรงของเนื้อดินโบนไชนามีค่าสูงกว่าเนื้อดินที่มีปริมาณของแก้วสูง ซึ่งในเนื้อดินโบนไชน่าจะมีค่าความแข็งแรงอยู่ในช่วง 98 -140 เมกะปาสคาล ดังนั้นผลการทดสอบความแข็งแรงในงานวิจัยนี้มีค่าอยู่ในช่วงความแข็งแรงของเนื้อดินโบนไชน่าตามมาตรฐาน และมีค่าใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์ทางการค้าซึ่งมีค่า 99.36 ± 9.03 เมกะปาสคาล

ตารางที่ 4.19 ค่าความแข็งแรงของเนื้อดินหลังเผาที่อุณหภูมิ 1,220 – 1,250 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิ (°C)	1220	1230	1240	1250
ความแข็งแรง (MPa)	76.70 ± 2.79	93.81 ± 6.15	94.81 ± 8.33	97.08 ± 2.48



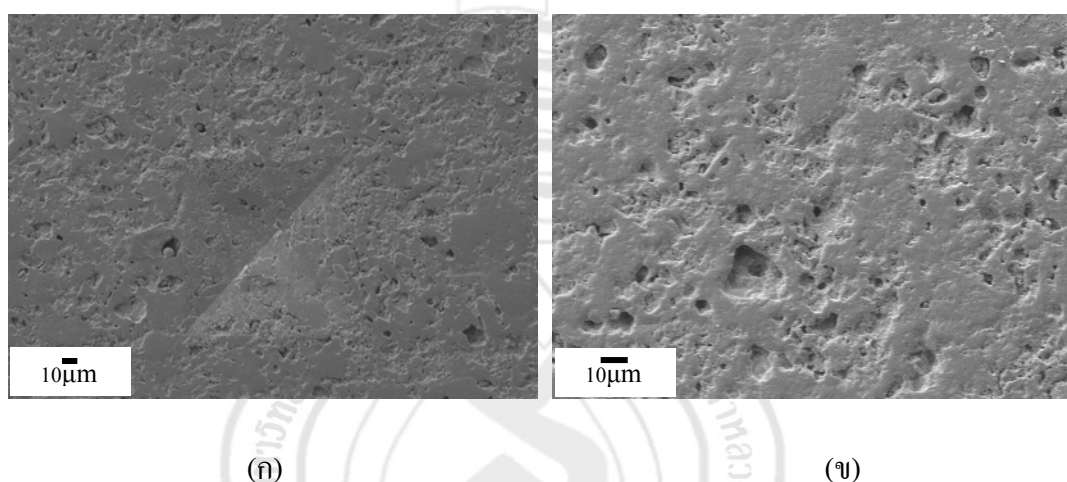
ภาพที่ 4.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงของเนื้อดินสูตรที่ 2
กับการเผาที่อุณหภูมิ 1,220 – 1,250 องศาเซลเซียส

4.3.1.6 ผลการทดลองค่าความต้านทานการแตกร้าว

ผลการศึกษาความต้านทานการแตกร้าว (fracture toughness) ของชิ้นทดสอบหลังการเผาอบพูนิกที่อุณหภูมิ 1,220 -1,250 องศาเซลเซียส และขัดผิวหน้าของชิ้นตัวอย่างหลังจากนั้นนำไปทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความแข็ง (Vicker microhardness) ด้วยแรง 2 กิโลกรัม หลังจากนั้นนำชิ้นตัวอย่างไปวัดรอยแตกร้าว สำหรับการคำนวณค่าความต้านทานการแตกร้าวจะใช้สมการที่ 3.6 ในสูตรการคำนวณต้องใช้ค่า Young's modulus ซึ่งสามารถหาค่าได้จากการทดสอบความแข็งแรง ด้วยวิธี Three-point bending (Ustundag et al., 2006) โดยใช้สูตรการคำนวณตามมาตรฐานการทดสอบอเมริกา ASTM C674 จากการทดสอบพบว่าชิ้นตัวอย่างหลังเผาที่อุณหภูมิ 1,220 และ 1,230 องศาเซลเซียส ไม่เกิดรอยแตกเนื่องจากเนื้อดินมีความพรุนต่ำสูงและมีความหนาแน่นต่ำ ดังนั้นความพรุนตัวของเนื้อดินทำให้รอยแตกที่ เกิดจากการกดไม่สามารถเกิดขึ้นได้ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 4.27 แต่หลังจากเผาอบพูนิกที่อุณหภูมิ 1,240 และ 1,250 องศาเซลเซียส เนื้อดินมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นดังนั้นจึงเกิดรอยแตกร้าวและสามารถวัดค่าความต้านทานการแตกร้าวได้ซึ่งมีค่าประมาณ $2.05 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ และ $1.90 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ซึ่งมีค่าความต้านทานการแตกร้าวใกล้เคียงกับการรายงานผลงานวิจัยของ Ustundag et al. (2006) ที่มีค่าประมาณ $2 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$

ตารางที่ 4.20 ค่าการต้านทานการแตกร้าวของเนื้อดินหลังเผาที่อุณหภูมิ
1,220 – 1,250 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิ (°C)	1220	1230	1240	1250
การต้านทานการแตกร้าว (MPa. m ^{1/2})	–	–	2.05 ± 0.23	1.90 ± 0.36



ภาพที่ 4.27 เนื้อดินหลังเผาที่อุณหภูมิ 1,220 (ก) และ 1,230 องศาเซลเซียส (ข)
ที่ผ่านการกดจากหัวกด (Vicker Microhardness)

4.3.1.7 ผลการวิเคราะห์สี

ผลการวิเคราะห์สีด้วยเครื่องวัดสี (Spectrophotometer) โดยงานวิจัยนี้จะใช้ผลิตภัณฑ์ทางการค้าเปรียบเทียบกับขั้นตอนสอบเนื้อดินสูตรที่ 2 หลังเผาอบผึ่งที่อุณหภูมิ 1,220 -1,250 องศาเซลเซียส แสดงในตาราง 4.5 ผลการวิเคราะห์พบว่าค่า L ซึ่งเป็นค่าที่บอกความขาว - ดำ พบว่าขั้นตอนในงานวิจัยนี้มีค่าความขาวใกล้เคียงกัน คือ L มีค่าประมาณ 93 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าผลิตภัณฑ์ทางการค้าที่มีค่า L เท่ากับ 95.01 เมื่อพิจารณาค่า a* พบว่าค่ามีค่าติดลบ (-a) ซึ่งหมายถึงขั้นตอนในงานวิจัยนี้และผลิตภัณฑ์ทางการค้ามีสีเขียวปะปนอยู่ และเมื่อพิจารณาจากค่า b* พบว่าค่ามีค่าเป็นบวก (+b) ซึ่งหมายถึงว่าขั้นตอนและผลิตภัณฑ์ทางการค้ามีสีเหลือง ดังนั้นเนื้อ

ดินโบนไชน่าของงานวิจัยนี้และผลิตภัณฑ์ทางการค้ามีสีขาวครีมเช่นเดียวกันแต่มีแตกต่างที่ความขาวของผลิตภัณฑ์ทางการค้ามีสีขาวกว่า ซึ่งความขาวของเนื้อดินขึ้นอยู่กับปริมาณสิ่งปนเปื้อนที่อยู่ในวัตถุดิบเริ่มต้นซึ่งในงานวิจัยนี้จะคำนึงถึงปริมาณเฟอร์ริกออกไซด์และปริมาณสิ่งปนเปื้อนอาจมีมากกว่าในส่วนผสมของผลิตภัณฑ์ทางการค้า

ตารางที่ 4.21 ค่าสีของเนื้อดินหลังเผาอบผงที่อุณหภูมิ 1,220 - 1,250 องศาเซลเซียส
เปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์ทางการค้า(ผลิตในประเทศ)

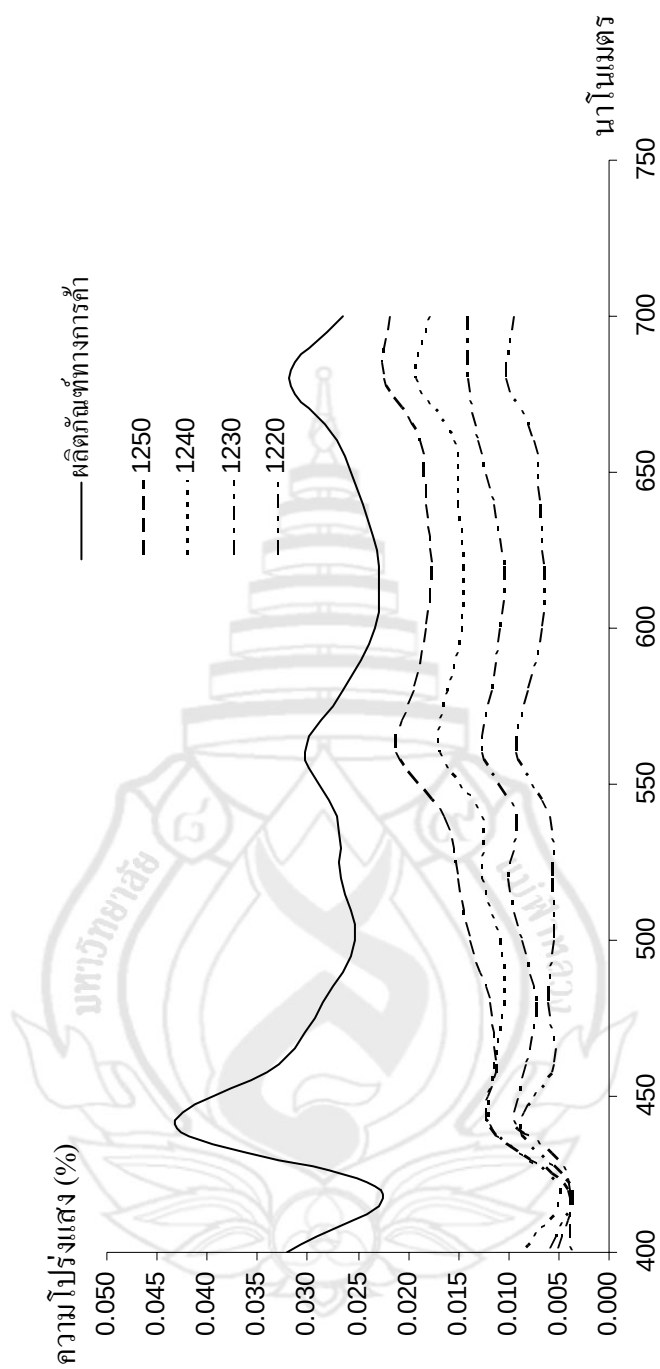
อุณหภูมิ (°C)	1220	1230	1240	1250	ผลิตภัณฑ์ ทางการค้า
L	93.15	93.03	93.11	93.04	95.01
a*	-0.29	-0.46	-0.60	-0.54	-0.59
b*	4.45	4.18	3.85	4.01	2.24

4.3.1.8 ผลการวิเคราะห์ความโปร่งแสง

ผลการวิเคราะห์ความโปร่งแสงด้วยเครื่อง UV – VIS Spectrophotometer โดยงานวิจัยนี้จะใช้ผลิตภัณฑ์ทางการค้าเปรียบเทียบกับชิ้นทดสอบเนื้อดินสูตรที่ 2 หลังเผาอบผงที่อุณหภูมิ 1,220 - 1,250 องศาเซลเซียส ชิ้นทดสอบสำหรับใช้วิเคราะห์ความโปร่งแสงมีความหนา 3 มิลลิเมตร นำไปวิเคราะห์โดยใช้ความยาวคลื่น ตั้งแต่ 400 - 700 นาโนเมตร ผลการวิเคราะห์แสดงไว้ในภาพที่ 4.28 พบว่าค่าความโปร่งแสงของชิ้นงานมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการเผา เป็นเพราะเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการเผาจะทำให้เนื้อดินมีความหนาแน่นสูงขึ้น รูพรุนปรากฏลดลง (Kingery, 1976) และผลึกอะนอร์ไทต์ที่อยู่ภายในเนื้อดินโบนไชน่าซึ่งผลึกอะนอร์ไทต์มีค่าการหักเหของแสงมีค่า 1.58 ซึ่งใกล้เคียงกับแก้วคือ 1.5 (Capoglu & Messer, 2002) ค่าความโปร่งแสงของชิ้นงานในงานวิจัยนี้มีค่าความโปร่งแสงน้อยกว่าผลิตภัณฑ์ทางการค้าเนื่องจากผลิตภัณฑ์ทางการค้ามีความหนาแน่นสูงเท่ากับ 2.65 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตรและมีความพรุนตัวปรากฏเป็น 0.00 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ค่าความหนาแน่นในงานวิจัยนี้มีค่าเท่ากับ 2.54 ต่อลูกบาศก์เซนติเมตรและมีรูพรุนปรากฏเท่ากับ 0.07 เปอร์เซ็นต์ส่งผลให้ค่าความโปร่งแสงมีค่าน้อยกว่าเนื่องจากปริมาณรูพรุนที่มีมากจะมีผลต่อการสะท้อนกลับของแสงมากกว่าปริมาณรูพรุนน้อย จึงทำให้เกิดการแปรผันกับการส่องผ่านของแสง (Kingery, 1976) นอกจากนั้น โครงสร้างทางจุลภาคของผลิตภัณฑ์ทางการค้าพบว่ามี

ผลึกอะนอร์ไทต์ แสดงในภาพที่ 4.34 มีขนาดใหญ่กว่าชั้นทดสอบในงานวิจัยนี้ ซึ่งขนาดของผลึกอาจเป็นตัวช่วยเพิ่มความโปร่งแสงของผลิตภัณฑ์ และจากโครงสร้างทางผลึกแสดงในภาพที่ 4.29 พบว่า อะนอร์ไทต์ซึ่งเป็นช่วยเพิ่มความโปร่งแสงของโบนไชนามีปริมาณใกล้เคียงกันแต่ปริมาณควอตซ์ของผลิตภัณฑ์ทางการค้ามีน้อยกว่าชั้นทดสอบในงานวิจัยนี้ ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าผลิตภัณฑ์ทางการค้าควอตซ์ได้ละลายเป็นแก้วมากกว่าในชั้นทดสอบนี้ จึงทำให้ความโปร่งแสงของผลิตภัณฑ์ทางการค้ามีค่ามากกว่าชั้นทดสอบในงานวิจัยนี้

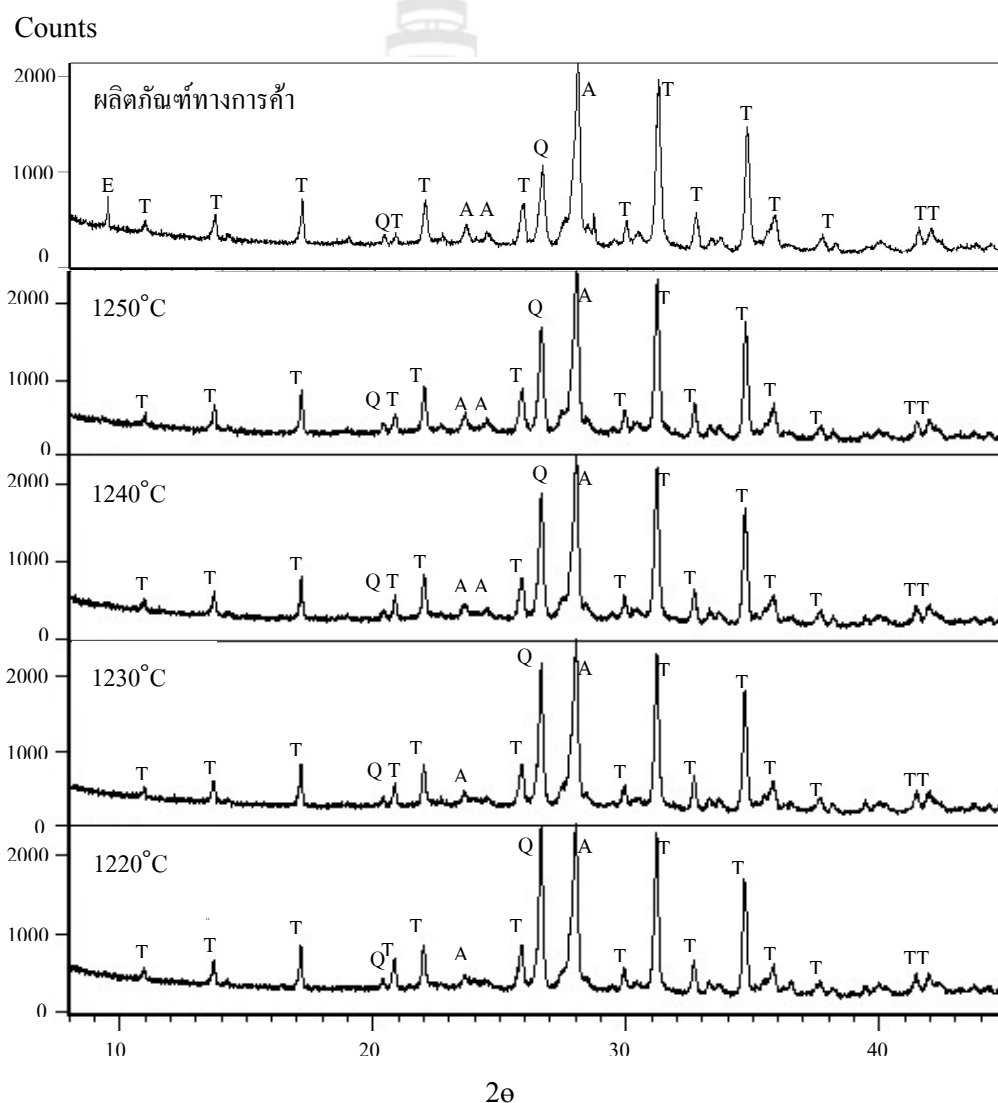




ภาพที่ 4.28 ค่าความโปร่งแสงด้วยเครื่อง UV- VIS Spectrophotometer ของเนือดินหลังเผา ที่อุณหภูมิ 1,220 – 1,250 องศาเซลเซียส เปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์ทางการค้า

4.3.2 ผลการศึกษาโครงสร้างทางผลึก

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางผลึกด้วยเทคนิค XRD ของเนื้อดิน หลังการเผาอบผก ที่อุณหภูมิ 1,220 – 1,250 องศาเซลเซียส พบว่ามีฟิสิกของอะนอร์ไทต์ ($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) ไตรแคลเซียมฟอสเฟต ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) และควอตซ์ (SiO_2) ซึ่งการเผาในช่วงอุณหภูมินี้ปริมาณของผลึกทั้ง 2 ไม่มีการเปลี่ยนแปลง นอกจากปริมาณของควอตซ์ลดลงเล็กน้อยเมื่อเผาอุณหภูมิสูงขึ้น ส่วนผลิตภัณฑ์ทางการค้าประกอบด้วยอะนอร์ไทต์ ไตรแคลเซียมฟอสเฟต และอิงลิชไซด์ ($\text{K}_2\text{Ca}_4\text{Al}_8(\text{PO}_4)_8(\text{OH})_{10}$) ดังภาพที่ 4.29



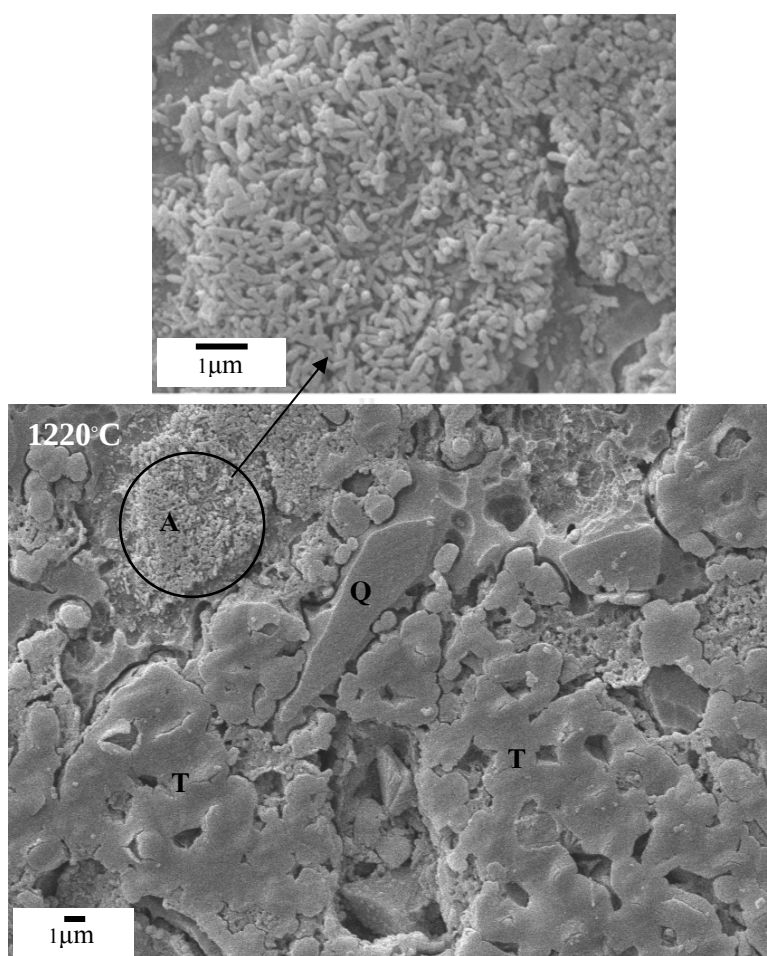
ภาพที่ 4.29 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของชิ้นทดสอบเนื้อดินโบนไชน่าสูตรที่ 2

A = อะนอร์ไทต์ T = ไตรแคลเซียมฟอสเฟต Q = ควอตซ์ E = อิงลิชไซด์

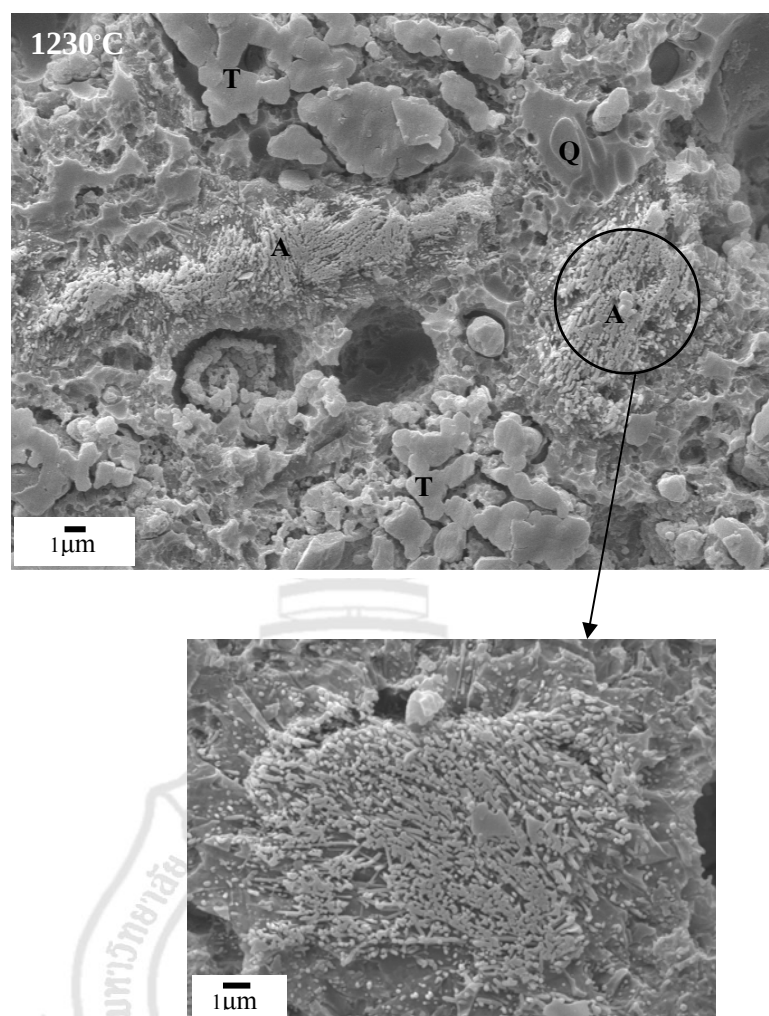
4.3.3 ผลการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาค

ผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) ของเนื้อดินโบน ไซนาหลังเผาที่อุณหภูมิ 1,220-1,250 องศาเซลเซียส เป็นภาพโครงสร้างทางจุลภาคกำลังขยาย 2500 เท่า ดังภาพที่ 4.30 – 4.33 ซึ่งแสดงภาพโดยรวมของผลึกไตรแคลเซียมฟอสเฟต (T) มีลักษณะของผลึกจะเป็นก้อนกลมที่อบชนิกเข้าด้วยกัน ส่วนอะนอร์ไทต์มีลักษณะเป็นแท่งยาว (A) และควอดซ์เป็นก้อนขนาดใหญ่ การเผาที่อุณหภูมิต่างกัน 10 องศาเซลเซียส ขนาดของผลึกไม่แสดงการโต และจากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD มีปริมาณไม่ต่างกัน ผลัดกันทางด้านการค้าพบว่าไม่มีไตรแคลเซียมฟอสเฟตและอะนอร์ไทต์ซึ่งลักษณะของผลึกจะเหมือนกับขั้นตอนของงานวิจัยนี้ แต่ผลึกอะนอร์ไทต์มีขนาดผลึกใหญ่กว่า จากการตรวจสอบด้วย EDS แสดงในภาพที่ 4.35 (ข) พบว่าผลึกอะนอร์ไทต์ ($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) มีองค์ประกอบของ Ca Si Al และมี K อยู่เช่นเดียวกับขั้นตอนทดสอบในงานวิจัยนี้

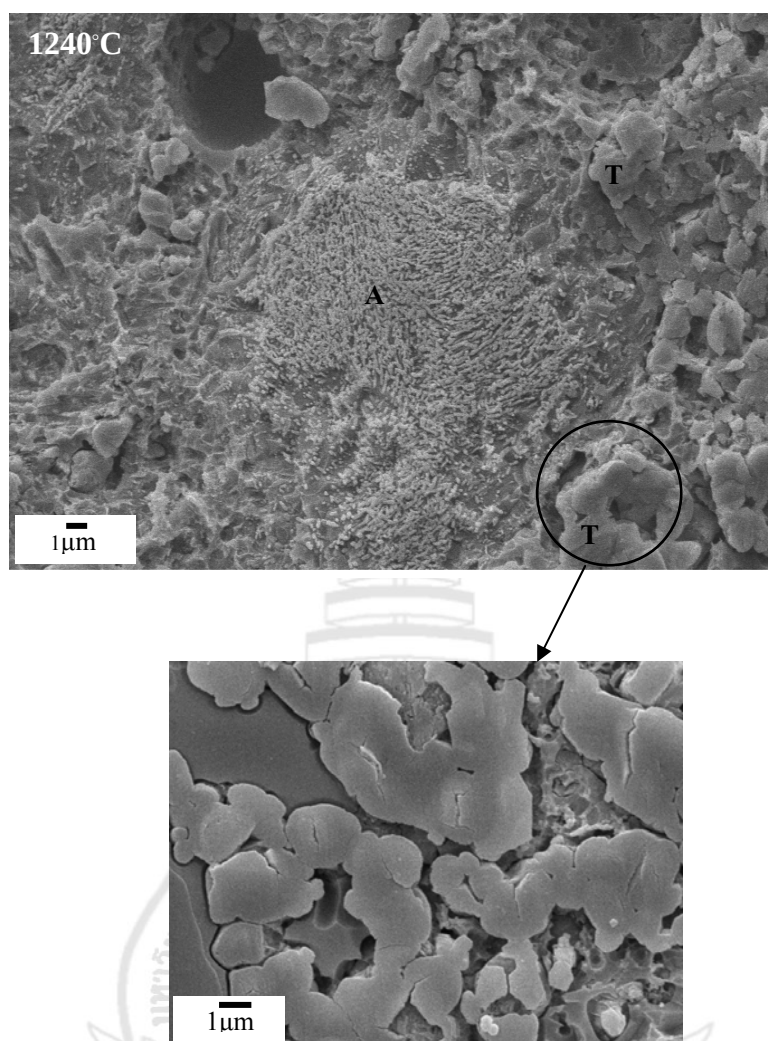




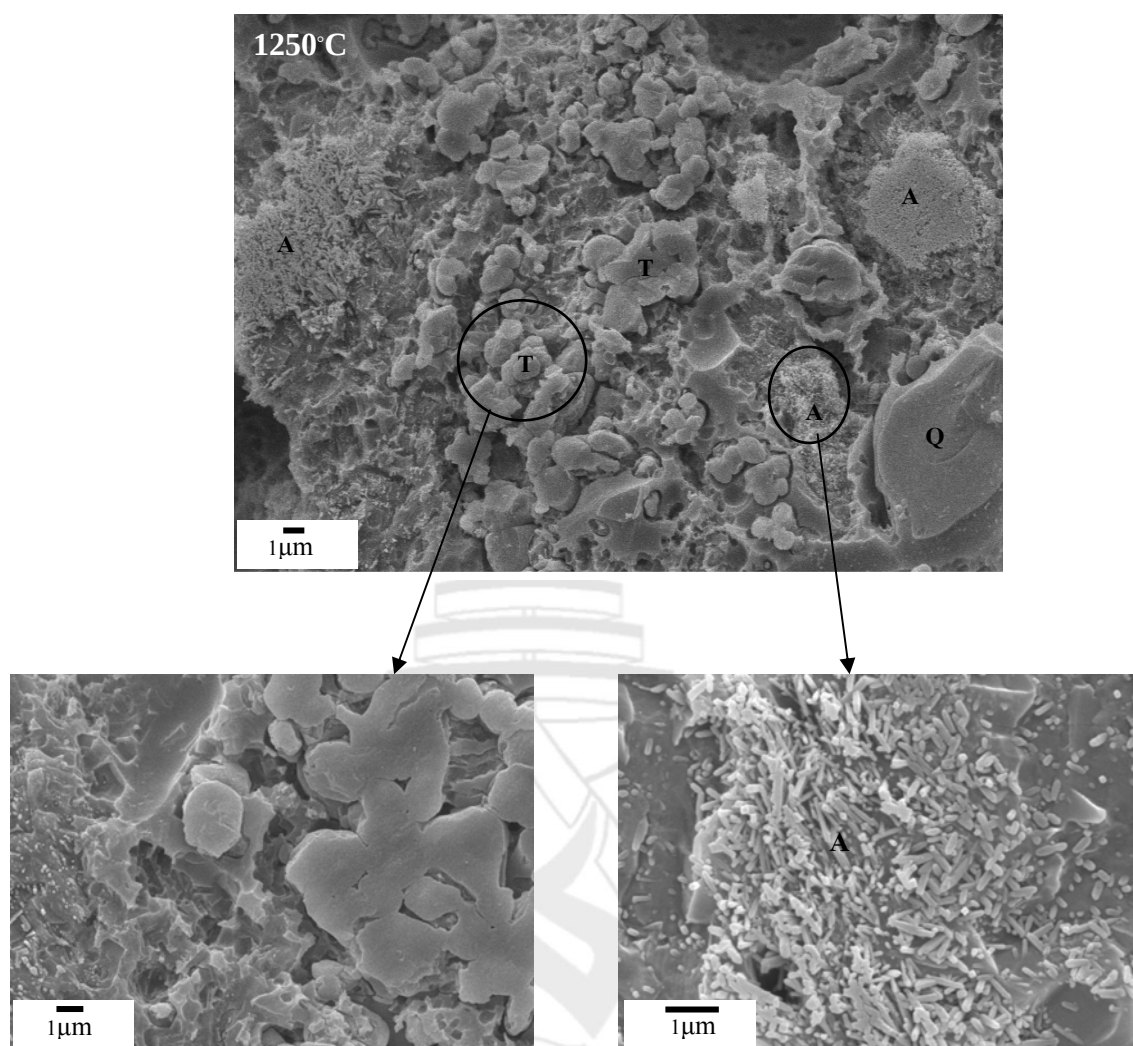
ภาพที่ 4.30 ตัวอย่างเนื้อดินสูตรที่ 1 หลังเผาอบที่อุณหภูมิ 1,220 องศาเซลเซียส แสดงภาพโครงสร้างทางจุลภาคโดยรวม ไตรแคลเซียมฟอสเฟต (T) ; อะนอร์ไทต์ (A)



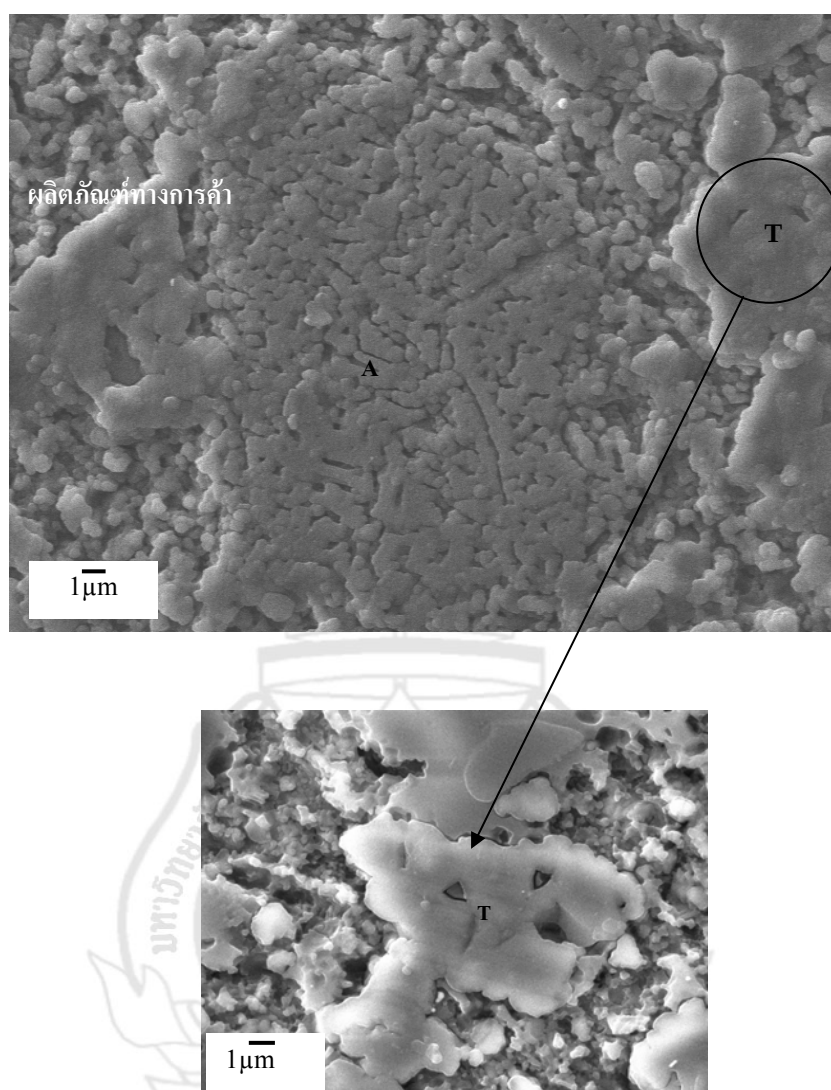
ภาพที่ 4.31 ตัวอย่างเนื้อดินสูตรที่ 1 หลังเผาอบที่อุณหภูมิ 1,230 องศาเซลเซียส แสดงภาพโครงสร้างทางจุลภาคโดยรวม ไตรแคลเซียมฟอสเฟต (T); อะนอร์ไทต์ (A)



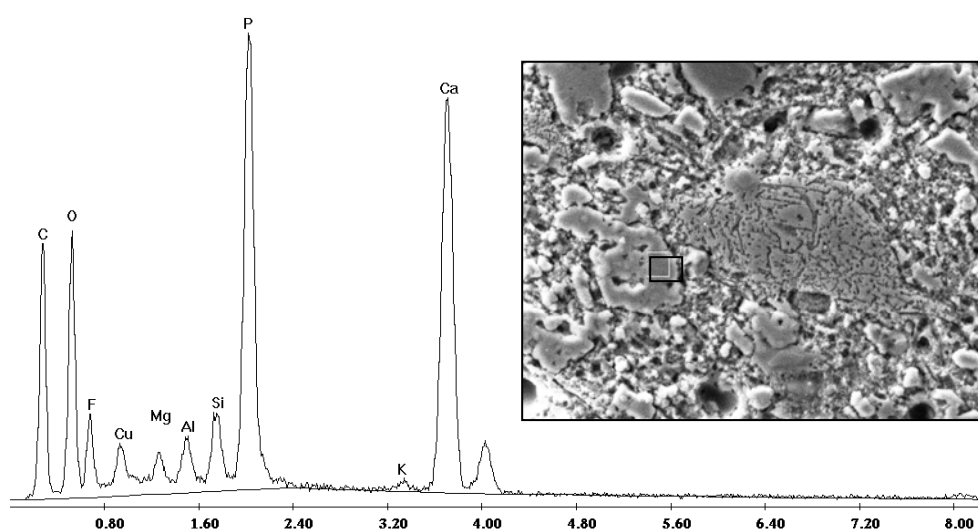
ภาพที่ 4.32 ตัวอย่างเนื้อดินสูตรที่ 1 หลังเผาอบที่อุณหภูมิ 1,240 องศาเซลเซียส แสดงภาพโครงสร้างทางจุลภาคโดยรวม ไตรแคลเซียมฟอสเฟต (T) ; อะนอร์ไทต์ (A)



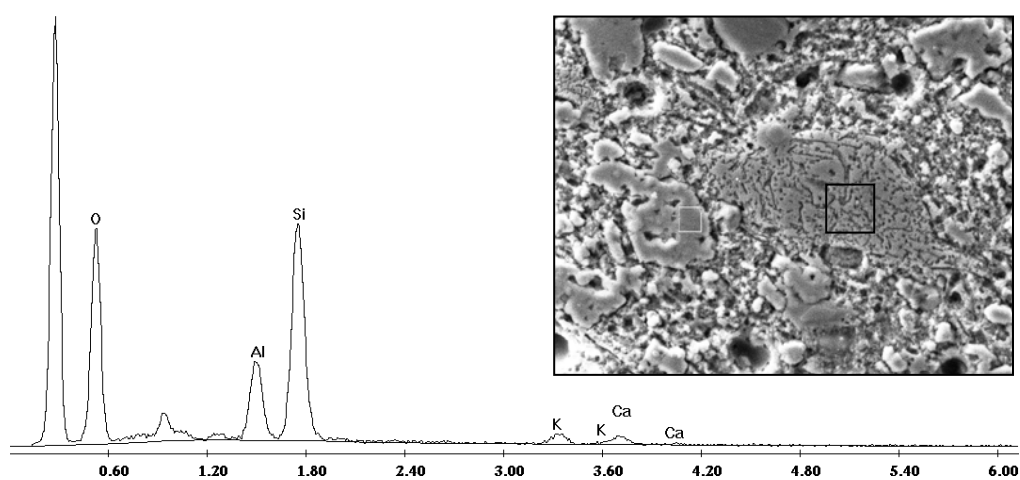
ภาพที่ 4.33 ตัวอย่างเนื้อดินสูตรที่ 1 หลังเผาอบที่อุณหภูมิ 1,250 องศาเซลเซียส แสดงภาพโครงสร้างทางจุลภาคโดยรวม ไตรแคลเซียมฟอสเฟต (T) ; อะนอร์ไทต์ (A)



ภาพที่ 4.34 ภาพโครงสร้างทางจุลภาคของเนื้อดินโบนไชน่าของผลิตภัณฑ์ทางการค้า
ไตรแคลเซียมฟอสเฟต (T) ; อะนอร์ไทต์ (A)



(ก) ผลึกไฮดรอกซีอะปาทิต ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$)



(ข) ผลึกอะนอร์ไทต์ ($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$)

ภาพที่ 4.35 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี (EDS) ของผลึกไฮดรอกซีอะปาทิต และผลึกอะนอร์ไทต์ ของชิ้นงานของผลิตภัณฑ์ทางการค้า

4.4 ผลการทดลองขั้นตอนที่ 4

ขั้นตอนนี้เป็นการนำส่วนผสมของเนื้อดินสูตรที่ 2 มาทำการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์โดยวิธีการหล่อน้ำดินที่มีปริมาณของแข็ง 41, 43 และ 45 เปอร์เซ็นต์ สังเกตการไหลตัวของน้ำดิน และผลหลังการหล่อ หลังการขึ้นรูปนำผลิตภัณฑ์ไปเผาที่อุณหภูมิ 1,250 องศาเซลเซียส และศึกษาความหนาแน่น ซึ่งแสดงผลในตารางที่ 4.22

ตารางที่ 4.22 พฤติกรรมของน้ำดินและลักษณะผลิตภัณฑ์ที่มีปริมาณของแข็งต่างกัน

ปริมาณของแข็ง (%)	การไหลตัว	การแตกร้าวหลังการหล่อ		ความหนาแน่น หลังการเผา (g/cm ³)
		ไม่คลุมพลาสติก	คลุมพลาสติก	
41	ดี	แตก	ไม่แตก	2.68 ± 0.02
43	หนืด	ไม่แตก	ไม่แตก	2.69 ± 0.03
45	หนืด	ไม่แตก	ไม่แตก	2.67 ± 0.02

ผลการทดลองการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ด้วยวิธีการหล่อน้ำดินพบว่าน้ำดินที่มีปริมาณของแข็ง 68 เปอร์เซ็นต์ เป็นน้ำดินที่มีการไหลตัวดี แต่น้ำดินที่มีปริมาณของแข็ง 43 และ 45 เปอร์เซ็นต์ น้ำดินมีความหนืด จะต้องเพิ่มตัวช่วยการกระจายตัว (Dispex) โดยปรับความถ่วงจำเพาะเป็น 1.8 ใช้เวลาการหล่อ 2 นาที สำหรับการทดลองการหล่อผลิตภัณฑ์พบว่าหลังการหล่อน้ำดินที่มี ปริมาณของแข็ง 41 เปอร์เซ็นต์ และปล่อยให้ความชื้นออกไปตามปกติทำให้เกิดรอยแตกที่ก้นของผลิตภัณฑ์ ดังภาพที่ 4.34 และอาจเป็นเพราะปริมาณน้ำในน้ำดินมีมากเกินไป (ไพจิตร อังศิริวัฒน์, 2541) แต่หลังจากทดลองโดยการให้ความชื้นระเหยไปอย่างช้าๆ โดยวิธีการคลุมผลิตภัณฑ์ด้วยถุงพลาสติกพบว่าไม่มีรอยแตกเกิดขึ้นดังรูปที่ 4.35 แต่น้ำดินที่มีปริมาณของแข็ง 43 และ 45 เปอร์เซ็นต์ ไม่เกิดรอยแตกที่ก้นผลิตภัณฑ์แม้จะปล่อยให้ความชื้นออกไปตามปกติ ดังนั้นน้ำดินสำหรับการหล่อควรใช้ปริมาณน้ำ 48 หรือ 44 เปอร์เซ็นต์ มีปริมาณของแข็ง 43 และ 45 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ความหนาแน่นหลังการเผาที่อุณหภูมิ 1,250 องศาเซลเซียส มีค่าประมาณ 2.68 กรัมต่อ

ลูกบาศก์เซนติเมตร ในภาพที่ 4.36 เป็นน้ำดินที่มีปริมาณของแข็ง 43 เปอร์เซนต์ ผลិតภัณฑ์หลังการเผาที่อุณหภูมิ 1,250 องศาเซลเซียสมีความโปรงแสงดี



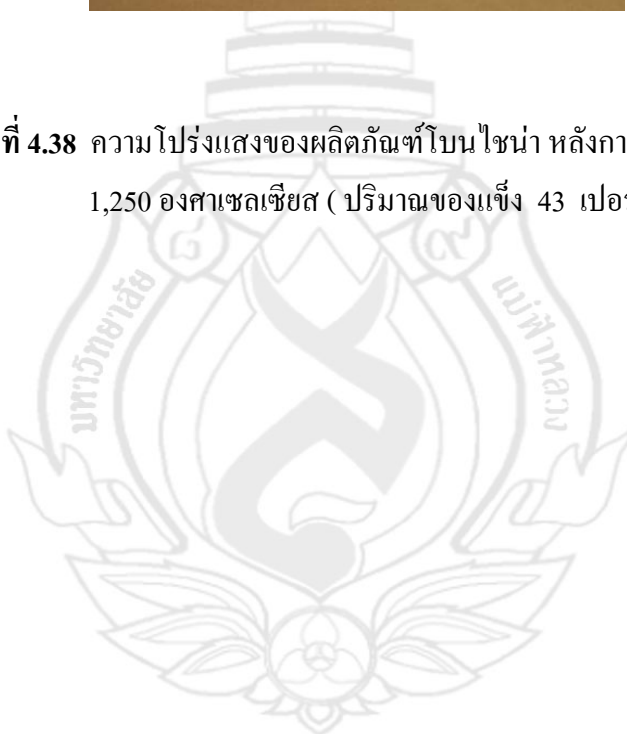
ภาพที่ 4.36 รอยแตกบริเวณก้นผลิตภัณฑ์ก่อนเผาหลังการหล่อ



ภาพที่ 4.37 ผลิตภัณฑ์ก่อนเผาหลังการปล่อยให้ความชื้นค่อยๆออก



ภาพที่ 4.38 ความโปร่งแสงของผลิตภัณฑ์โบนไชน่า หลังการเผาที่อุณหภูมิ
1,250 องศาเซลเซียส (ปริมาณของแข็ง 43 เปอร์เซ็นต์)



บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลองขั้นตอนที่ 1

จากการศึกษาลักษณะเฉพาะเบื้องต้นของหินผุลำปางจาก 2 บริษัท ได้แก่ บริษัทภัทรรัตน์ เคลย์แอนด์มินเนรัล จำกัดและบริษัท ที ไอ ซี และดินขาว 3 แหล่ง ได้แก่ ดินขาวลำปาง ดินขาวระนอง และดินขาวนราธิวาส เพื่อเปรียบเทียบปริมาณ Fe_2O_3 ซึ่งเป็นสารให้สีในวัตถุดิบซึ่งมีผลต่อความขาวของเนื้อดินโบนไชน่า ผลการวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบทางเคมีของหินผุลำปาง พบว่าหินผุของ บริษัทภัทรรัตน์ เคลย์แอนด์มินเนรัล จำกัด มีปริมาณ Fe_2O_3 เท่ากับ 0.46 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีปริมาณน้อยกว่าในหินผุของบริษัท ที ไอ ซี จำกัด ซึ่งมีปริมาณ 0.66 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ผลการศึกษาปริมาณ Fe_2O_3 ในดินขาวในแต่ละแหล่ง พบว่าดินขาวนราธิวาสมีปริมาณ Fe_2O_3 น้อยที่สุด เท่ากับ 0.74 เปอร์เซ็นต์ ส่วนดินขาวลำปาง และดินขาวระนอง มีปริมาณ Fe_2O_3 เท่ากับ 1.10 และ 1.85 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ผลวิเคราะห์ปริมาณแร่ในหินผุของบริษัทภัทรรัตน์ เคลย์แอนด์มินเนรัล จำกัด พบว่ามีแร่โอลด์ เฟลด์สปาร์ เคโอลิไนต์ และควอตซ์ คล้ายกับหินคอร์นิช จากปริมาณของ Fe_2O_3 ในวัตถุดิบทั้ง 2 ชนิด จึงเลือกใช้หินผุลำปางของบริษัทภัทรรัตน์ เคลย์แอนด์มินเนรัล จำกัด และดินขาวนราธิวาส เป็นส่วนผสมในเนื้อดินโบนไชน่าต่อไป

5.2 สรุปผลการทดลองขั้นตอนที่ 2

จากการศึกษาในขั้นตอนที่ 1 เลือกหินผุลำปางของบริษัทภัทรรัตน์ เคลย์แอนด์มินเนรัล จำกัด และดินขาวนราธิวาสเป็นวัตถุดิบที่นำมาเป็นส่วนผสมในเนื้อดินโบนไชน่า โดยผสมเนื้อดินเป็น 2 สูตร คือ สูตรที่ 1 มีส่วนผสมคือ แก้วกระดูก หินผุ ดินขาว ในอัตราส่วน 50 : 25 : 25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และสูตรที่ 2 เดิมโพแทสเซียมเฟลด์สปาร์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ลงในสูตรที่ 1 เนื้อดินหลังการเผาที่อุณหภูมิ 800 – 1,250 องศาเซลเซียส พบว่าเนื้อดินสูตรที่ 1 มีค่าการหดตัว ค่าความหนาแน่น มีค่าน้อยกว่าสูตรที่ 2 ขณะที่ค่าความพรุนตัวปรากฏ และค่าการดูดซึมน้ำมากกว่าสูตรที่ 2 เนื่องจากเนื้อดินสูตรที่ 2 มีปริมาณตัวหลอมละลายมากกว่าเนื้อดินสูตรที่ 1 ผลการ

วิเคราะห์โครงสร้างทางผลึกของเนื้อดินทั้ง 2 สูตรพบว่าผลึกไตรแคลเซียมฟอสเฟต อะนอร์ไทต์ และควอตซ์ การศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคพบว่าผลึกไตรแคลเซียมฟอสเฟต และอะนอร์ไทต์ มีการโตขึ้นเมื่อเผาอุณหภูมิสูงขึ้น และกระจายอยู่บนเมตริกเดียวกัน

5.3 สรุปผลการทดลองขั้นตอนที่ 3

จากการทดลองในขั้นตอนที่ 2 เนื้อดินสูตรที่ 2 ถูกเลือกนำมาศึกษาอุณหภูมิการเผาที่เหมาะสมในช่วงอุณหภูมิ 1,220 – 1,250 องศาเซลเซียส ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล ความขาว ความโปร่งแสง การเปลี่ยนแปลงเฟส พบว่าสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลเหมาะสมที่สุดหลังการเผาที่อุณหภูมิ 1,250 องศาเซลเซียส ส่วนค่าความขาว และค่าความโปร่งแสง เมื่อเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์ทางการค้า พบว่าความขาวและความโปร่งแสงมีค่าน้อยกว่าผลิตภัณฑ์ทางการค้า ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกพบว่ามีไตรแคลเซียมฟอสเฟต อะนอร์ไทต์ และควอตซ์ ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคยังพบว่า ผลึกไตรแคลเซียมฟอสเฟต และอะนอร์ไทต์ มีการโตใกล้เคียงกัน

5.4 สรุปผลการทดลองขั้นตอนที่ 4

เป็นการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์โดยวิธีการหล่อโดยนำเนื้อดินสูตรที่ 2 เตรียมเป็นน้ำดินโดยมีปริมาณของแข็ง 41, 43 และ 45 เปอร์เซ็นต์ ผลจากการหล่อพบว่า ปริมาณของแข็ง มากกว่า 43 เปอร์เซ็นต์ ไม่เกิดการแตกร้าวหลังการหล่อ ความหนาแน่นหลังการเผาพบว่าค่าความหนาแน่นเท่ากับ 2.68 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และผลิตภัณฑ์มีความโปร่งแสงดี

5.5 ข้อเสนอแนะ

5.5.1 การเตรียมหินผุควรบดให้มีขนาดอนุภาคน้อยกว่า 10 ไมครอน เพื่อช่วยในการหลอมเหลวได้เร็วและมากขึ้น ซึ่งจะมีผลต่อสมบัติทางกายภาพ และสมบัติเชิงกล

5.5.2 ทดลองการนำโพแทสเซียมเฟลด์สปาร์มาใช้เป็นส่วนผสมในเนื้อดินบอโนไชน่าโดยไม่ใช้หินผุ

เอกสารอ้างอิง



เอกสารอ้างอิง

- กาญจนา อินทรชิต และ สุรพล ปลื้มใจ. (2536). การศึกษาวิจัยเพื่อประโยชน์จากหินพอดเตอร์
 ลำปางในการผลิตเซรามิกชนิดพอร์ซเลน. ลำปาง : หน่วยเทคโนโลยีเซรามิกเนื้อดินและ
 เคลือบ ศูนย์พัฒนาอุตสาหกรรมเครื่องเคลือบดินเผา.
- จรัสศรี สมบัติทวี. (2524) วัตถุดินในเนื้อดินบอนไชน่า. สืบค้นเมื่อสืบค้นเมื่อ 22 มิถุนายน 2551,
 จาก www.dss.go.th/dssweb/st-articles/bone_china.
- ครุณี วัฒนศิริเวช, สุธี วัฒนศิริเวช และ อภินันท์ นันทิยา. (2546). การศึกษาและปรับ
 ประสิทธิภาพของเนื้อดินเซรามิกจากแหล่งดินเวียงกาหลง. เชียงราย:
 มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง.
- ชนสรณ์ โสคติโสภา. (2545). บอนไชน่า. สืบค้นเมื่อ 22 มิถุนายน 2551, จาก
www.dss.go.th/dssweb/st-articles/.../ct_3_2545_bone_china_3.pdf
- บุญธรรม เรืองการ. (2523). เนื้อดินบอนไชน่า. เชียงใหม่: มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- ไพจิตร อังศิริวัฒน์. (2541). เนื้อดินเซรามิก. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์.
- แม่น อมรสิทธิ์ และสมชัย อัครทิวา. (2544). วัสดุวิศวกรรม. กรุงเทพฯ: แมคกรอ - ฮิล
 อินเตอร์ เนชั่นแนล เอ็นเตอร์ไพรส์ จำกัด.
- วรุณี ภิรมงคล. (2531). เอกสารผลงานวิจัยเนื้อดินบอนไชน่า. กรุงเทพฯ: ศูนย์วิจัยและ
 พัฒนาอุตสาหกรรมเซรามิก กองการวิจัยกรมวิทยาศาสตร์.
- วัชร ประกายี. (2549ก). วัตถุดินเซรามิก 1. สืบค้นเมื่อ 22 มิถุนายน 2551, จาก
www.mtec.or.th/special/cdm/articles/articles_1.html
- วัชร ประกายี. (2549ข). วัตถุดินเซรามิก 2. สืบค้นเมื่อ 22 มิถุนายน 2551, จาก
www.mtec.or.th/special/cdm/articles/articles_2.html
- อายุวัฒน์ สว่างผล. (2543). วัตถุดินที่ใช้แพร่หลายในงานเซรามิกส์. กรุงเทพฯ: โอเดียนสโตร์.

- Batista, S.A.F., Messer, P.F., & Hand, R.J. (2001). Fracture toughness of bone china and hard porcelain. **British Ceramic Transaction**, **100**(6), 256-259.
- Capoglu, A., & Messer, P.F. (2002). Design and development of a chamotte for use in a low – clay translucent whiteware. **European Ceramic Society**, **24**(7), 2067-2072.
- Colourware. (2009). **CIE L*a*b* colour space**. Retrieved Jan 20, 2010, from [http:// www.colourware.co.uk/cpfaq/](http://www.colourware.co.uk/cpfaq/)
- Das, S.Kr., & Dana, K. (2003). Differences in Densification Behaviour of K-and Na – feldspar – containing porcelain Bodies. **Thermochimica Acta**, **406**, 199 – 206.
- Ferrari, S., & Gualtieri, A.F. (2006). The use of illitic clays in the production of stoneware tile ceramics. **Applied clay science**, 73-81.
- Grimshaw, R.W. (1971). **The chemistry and physics of clays, (4th ed.)** London : Ernest bennImited, 949.
- Henkes, V.E., Onoda, G.Y. & Carty, W.M. (1996). **Science of whitewares**. (pp. 298). New York: The American Ceramic Society.
- Iqbal, Y., Messer, P.F. & Lee, W.E. (2000). Microstructural evolution in bone china. **British Ceramic Transactions**. **99**, 193-199
- Jiang, T., Li, G., Qiu, G., Fan, X., & Huang, Z. (2007). Thermal activation and alkali dissolution of silicon from illite. **Applied Clay Science**, **40**(1-4), 81-89.
- Kara, A. & Stevens, R. (2002a). Characterisation of biscuit fired bone china body microstructure. Part I: XRD and SEM of crystalline phases. **European Ceramic Society**, **22**(5), 731-736.
- Kara, A. & Stevens, R. (2002b). Characterisation of biscuit fired bone china body microstructure. Part II: Transmission electron microscopy (TEM) of glassy matrix. **European Ceramic Society**, **22**(5), 737-743.

- Kamseu, E., Leonelli, C., Boccaccini, D.N., Veronesi, P., Miselli, P., Giancarlo Pellacani, & Chinje Melo, U. (2007). Characterisation of porcelain compositions using two china clay from Cameroon. **Ceramics International**, 33(5), 851-857.
- Kingery, W.D., Bowen, H.K. & Uhlmann, D.R. (1976). **Introduction to ceramics**. (2nd ed.) New York: John Wiley and Sons Press.
- Kuchina Shigiji. (2538). **ดินและหินล้าปางในสายตาผู้เชี่ยวชาญ**. ขอนแก่น: มหาวิทยาลัยขอนแก่น
- Lawrence, W.G. (1972). **Ceramic science for the potter**. Radnor: Chilton book company.
- Maity, S. & Sarkar, B.K. (1995). Development of High – Strength Whiteware Bodies. **European Ceramic Society**, 1(4), 1083-1088.
- Meyers, M.A. & Chawla, K.K. (1999). **Mechanical behavior of materials**. Upper Saddle River, N.J: Prentice Hall.
- McColm, J. Ian. (1994). **Dictionnary of Ceramic Science and Engineering** . New York: Plenum Press .
- Norton, H.F. (1970). **Fine Ceramic – Technology and Application**. New York: McGraw-Hill.
- Reed, J.S. (1994). **Principles of Ceramics Processing**. (2nd ed.) New York: A Wiley – Interscience.
- Roberts, G.J. & Beech, D.G. (1951). Some effect of firing-schedule on the translucency and porosity of bone china. Br.Ceram.Res, Assoc, 296.
- Singer, F. (1963). **Industrial Ceramics**. New York : John Wiley and Sons.
- Transparency and translucency, (2008). **Translucency**. Retrieved Jan 20,2010, from [http:// www.wikipedia.org/wiki/ Transparency and translucency](http://www.wikipedia.org/wiki/Transparency_and_translucency).
- Ultraviolet-visible spectroscopy. (2008). **Beer - Lambert law**. Retrieved Jan 20,2010, from [http:// www.wikipedia.org/wiki/File:Beer_lambert1.png](http://www.wikipedia.org/wiki/File:Beer_lambert1.png)

Ustundag, C.B., Tur, Y.K., & Capoglu, A. (2006). Mechanical behaviour of a low-clay translucent whiteware. **European Ceramic Society**, **26** (1-2), 169-177.

Wattanasiriwech, D., Srijun, K., & Wattanasiriwech, S. (2009). Vitrification of illitic clay from Malaysia. **Applied Clay Science**, **41**(8), 1437-1446.

Worrall, W.E. (1982). **Ceramic raw materials**. Oxford: Peramon.

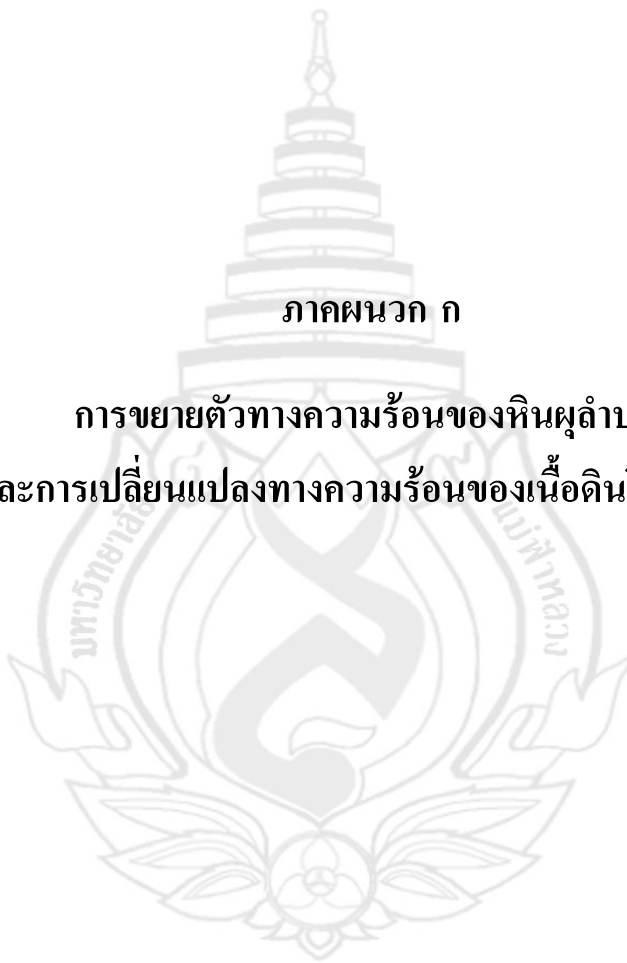


ภาคผนวก



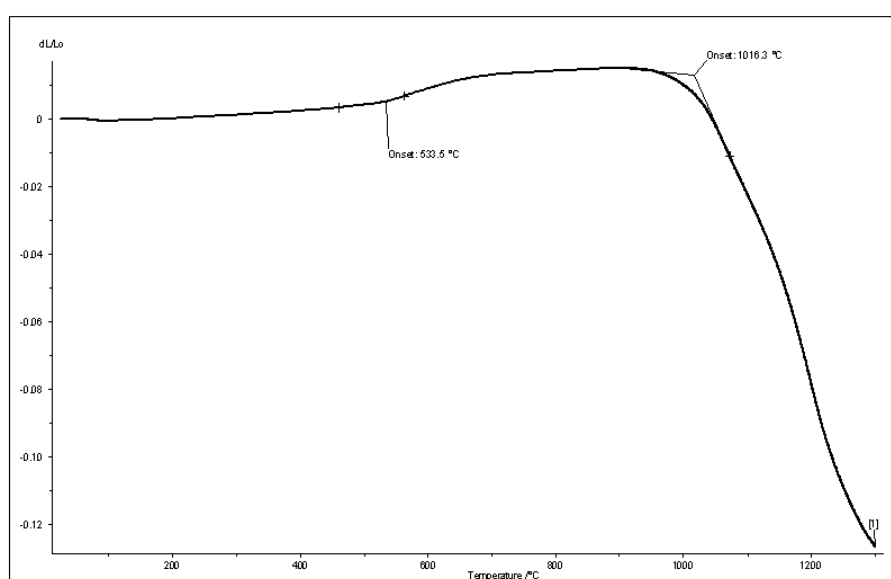
ภาคผนวก ก

การขยายตัวทางความร้อนของหินผุลำปาง
และการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของเนื้อดินบอนไซน้ำ



1. การขยายตัวทางความร้อนของหินผุ

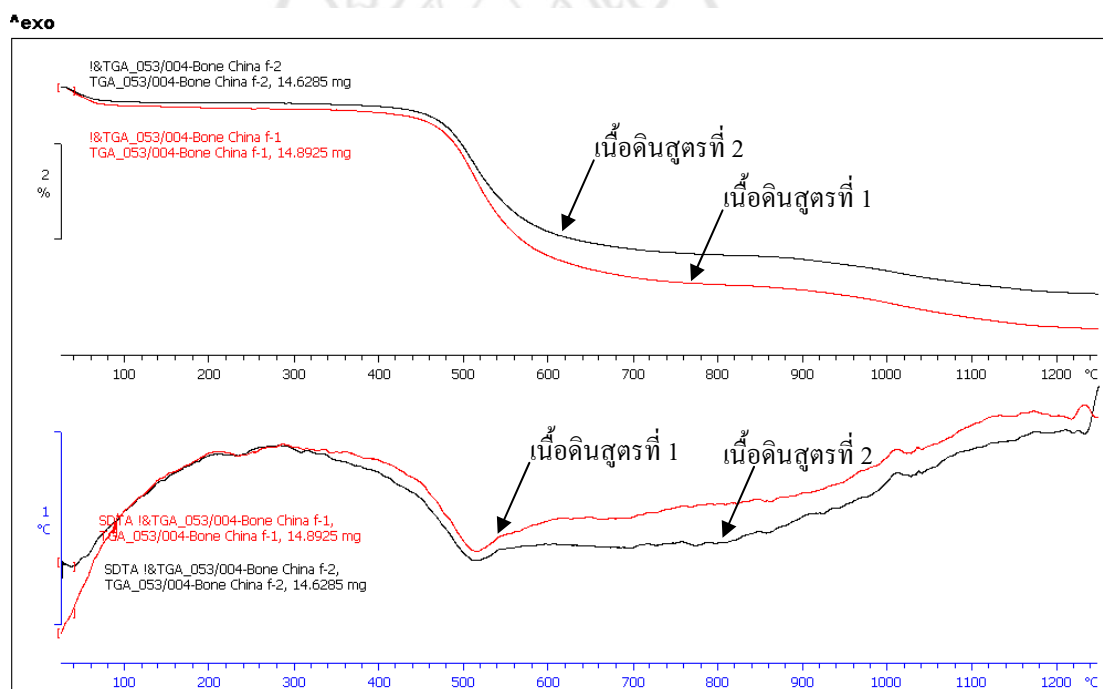
ผลการวัดค่าขยายตัวทางความร้อนของหินผุลำปาง ในช่วงอุณหภูมิ 25 – 1250 องศาเซลเซียส แสดงด้วยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความยาวที่เปลี่ยนไปเทียบกับความยาวเริ่มต้นของชิ้นทดสอบ (dL/L_0) พบว่ากราฟมีการขยายตัวก่อนที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส และ ลดลงหลังอุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียสซึ่งแสดงให้เห็นว่าหินผุเกิดการหลอมละลายในช่วงอุณหภูมินี้



ภาพที่ 1ก การขยายตัวของหินผุ (บริษัท ภัทรารัตน์ เคลย์แอนค്മิเนรัลจำกัด)
วัดด้วยเครื่องไดลาโตมิเตอร์ ช่วงอุณหภูมิ 25 – 1250 องศาเซลเซียส

2. การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของเนื้อดิน

จากการศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของเนื้อดินโบนไชน่าทั้ง 2 สูตรด้วยด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริกอะนาไลซิส (Thermogravimetric Analysis ;TGA) เพื่อศึกษาน้ำหนักที่หายไปหลังการเผา ร่วมกับการศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางความร้อน ณ ช่วงอุณหภูมิต่างๆขณะทำการเผาโดยใช้เทคนิคสิมัลเทเนียสดีฟเฟอเรนเทียลเทอร์มอลอะนาไลซิส (Simultaneous Differential Thermal Analysis ;SDTA) โดยใช้อุณหภูมิในช่วง 25 – 1250 องศาเซลเซียส ผลปรากฏว่าน้ำหนักที่หายไปหลังการเผาเนื้อดินทั้ง 2 สูตร เกิดขึ้น 2 ช่วง คือ ก่อนอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เกิดการหายไปของความชื้นและช่วง 400 – 700 องศาเซลเซียส เป็นการหายไปของน้ำในโครงสร้าง และผลการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนพบว่าเนื้อดินทั้ง 2 สูตรเกิดปฏิกิริยาคูดพลังงานที่อุณหภูมิประมาณ 500 องศาเซลเซียส ซึ่งเกิดการหายไปของน้ำในโครงสร้างสอดคล้องกับผล TGA และที่อุณหภูมิประมาณ 1000 องศาเซลเซียส เกิดปฏิกิริยาคายพลังงาน เป็นการเกิดขึ้นของผลึกไตรแคลเซียมฟอสเฟต และอะนอร์ไทต์ ซึ่งสามารถยืนยันได้จากผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางผลึก



ภาพที่ 2ก การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของเนื้อดินโบนไชน่าทั้ง 2 สูตร
ช่วงอุณหภูมิ 25-1250 องศาเซลเซียส

ภาคผนวก ข

หลักการทำงานของเครื่อง UV – VIS spectrophotometer



1. หลักการทำงานและส่วนประกอบในเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer

1.1 Spectrophotometer และ Beer's Law

แสง UV-Visible จัดอยู่ในช่วงความยาวคลื่น 200-800 นาโนเมตร โดยที่แสงหรือ Radiation เมื่อส่องผ่านสารที่สามารถดูดกลืนแสงได้ แสงจะถูกดูดกลืน เรียกว่า Absorbance (A) โดยสัมพันธ์กับค่า Transmittance (T) ดังนี้

$$A = \log \frac{I_0}{I}$$

I_0 = ความเข้มของแสงที่ตกกระทบ

I = ความเข้มของแสงที่เหลือ (Transmittance)

นอกจากนี้ความสัมพันธ์ตาม Beer's law อื่น ๆ ที่ควรทราบคือ

$$A = abc$$

โดยที่ a = absorbtivity

b = ระยะทางที่แสงส่องผ่าน หรือความกว้างของ cell

c = ความเข้มข้นของตัวอย่าง

นอกจากนี้

$$A = 2 - \log \% T = -\log T = \log \frac{1}{T}$$

$$T = \frac{I}{I_0}$$



ภาพที่ 1ข เครื่อง UV-VIS spectrophotometer ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น Lambda 35

1.2 องค์ประกอบของเครื่อง

เครื่อง UV-Visible Spectrophotometer ทุกชนิดประกอบด้วยองค์ประกอบหลักดังนี้คือ

- แหล่งกำเนิดแสง ให้แสงช่วงความยาวคลื่นที่เหมาะสมเช่น ระหว่าง 190-1000 นาโนเมตร
- Monochromator เป็นส่วนที่ใช้จัดการเกี่ยวกับแสงทำให้ผู้ใช้เลือกช่วงแสงที่จะนำมาวัดได้
- ช่องใส่ตัวอย่าง ใช้ใส่ตัวอย่างที่ต้องการวัด
- Detector / Amplifier ใช้วัดแสงที่เหลือจากการดูดกลืนของตัวอย่าง

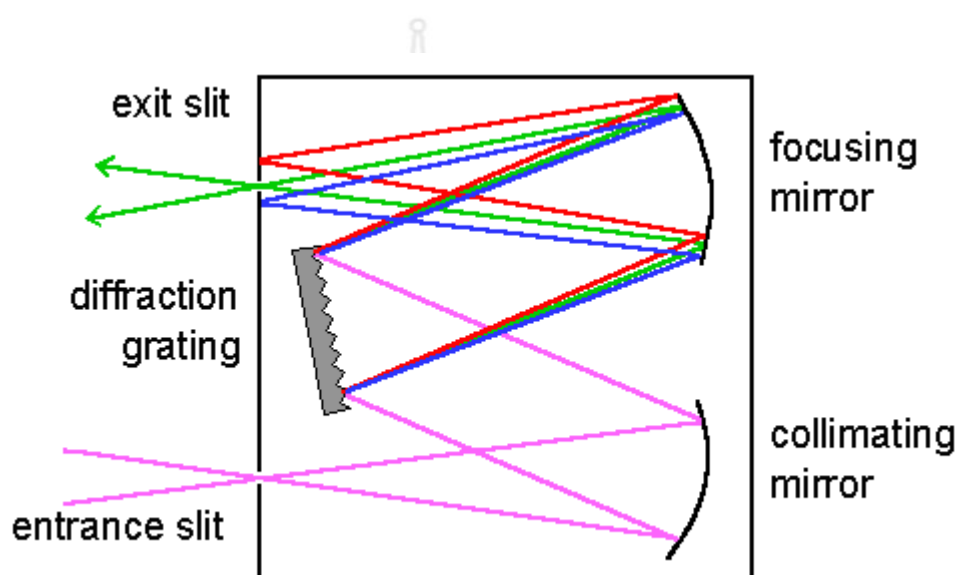
แหล่งกำเนิดแสงแหล่งกำเนิดแสงที่ดีควรให้แสงที่มีความเข้มสม่ำเสมอและแสงนิ่งตลอดช่วงความยาวคลื่นที่ใช้งานนอกจากนี้ควรมีขนาดพอเหมาะ ทนทาน และราคาไม่แพง หากเราคาดหวังทุกอย่างที่กล่าวมาเราจะใช้หลอดเพียงชนิดเดียวไม่ได้ ต้องมีหลอดอย่างน้อย 2 ชนิดที่จะครอบคลุมความต้องการดังกล่าวหลอดที่ว่านั้นคือ หลอดดิวทีเรียม และหลอดทังสเตน

หลอดทังสเตน นำมาใช้ในช่วง Visible โดยหลอดชนิดนี้ให้พลังงานตั้งแต่ 300 – 2000 นาโนเมตรปกติแล้วหลอดนี้มี Filament ที่ทำจากทังสเตนครอบด้วย Quartz แก้วภายในเป็นพวกกลุ่ม Halogen เช่น ไอโอดีน เป็นต้น หลอดชนิดนี้มีข้อดีในด้านให้พลังงานสูงโดยเฉพาะในช่วงความยาวคลื่น 300 – 400 นาโนเมตร

หลอดดิวทีเรียม เป็นหลอดที่ทำงานได้ดีที่สุดในช่วงความยาวคลื่นต่ำกว่า 300 นาโนเมตร โดยปกติแล้วหลอดนี้จะให้แสงที่ต่อเนื่องและสม่ำเสมอในช่วง 180 – 400 นาโนเมตร ส่วนที่ครอบของหลอดนี้จะทำ จาก Quartz เช่นกัน

Monochromator ทำหน้าที่แยกแสงออกเป็นแต่ละความยาวคลื่นและแยกส่วนความยาวคลื่นที่ต้องการไปใช้วัดตัวอย่าง

Monochromator โดยทั่วไปแล้วประกอบไปด้วย Entrance slit ที่ใช้จำกัดให้แสงผ่านเข้าไปในกรอบการใช้งานที่ต้องการ จากนั้น Collimating mirror จะนำแสงเข้าระบบไปสู่ส่วน Diffraction grating ซึ่งจะแตกแสงออกเป็นความยาวคลื่นต่าง ๆ โดยที่ Focusing mirror จะเล็งแสงที่แตกแล้วนี้ผ่านออกไปยัง Exit slit ไปยังตัวอย่าง



ภาพที่ 2ข Czerny – Turner Monochromator

ช่องใส่ตัวอย่าง ปกติจะออกแบบให้มีฝาครอบ หรือเลื่อนปิดอย่างมิดชิด เพื่อไม่ให้แสงจากภายนอกตกไปยัง Detector ส่วนที่ใช้ใส่ตัวอย่างนี้จะปิดกันอย่างดีเพื่อป้องกัน Monochromator และ Detector

Cell ที่ใช้มักจะเป็น Cuvette รูปทรงต่าง ๆ วัสดุมีให้เลือกหลัก ๆ คือ Quartz optical glass และพลาสติก การเลือกวัสดุนั้นจะขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นที่ใช้วัด และลักษณะของตัวอย่าง ถ้าจะใช้ความยาวคลื่นต่ำกว่า 350 nm ต้องใช้ cell ที่ทำจาก Quartz ที่จริงแล้ว Cuvette ที่ทำจาก Quartz นั้นจะใช้ได้ตลอดช่วง UV-Visible เช่น ตั้งแต่ 190 – 1000 นาโนเมตร เป็นต้น ส่วน Optical glass ใช้ได้ในช่วงความยาวคลื่นมากกว่า 300 นาโนเมตร และสำหรับพลาสติกจะใช้ได้ในช่วง Visible เท่านั้น คือตั้งแต่ 350 นาโนเมตร เป็นต้นไปขนาดของ Cell ทั่ว ๆ ไปคือ 10 มิลลิเมตร รูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส มีความสูงที่จุสารละลายได้ประมาณ 2-3 มิลลิลิตร แต่ถ้าหากมีตัวอย่างจำกัด ผู้ใช้สามารถ

เลือกซื้อ Cell ซึ่งจะลดขนาดโดยลดความกว้างของ Cell แต่ Path length (ระยะที่แสงส่องผ่าน) ยังคงเดิม

Detector ทำหน้าที่แปลงพลังงานแสงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าที่มีใช้กันใน UV-VIS Spectrophotometer มี 2 ชนิดคือ

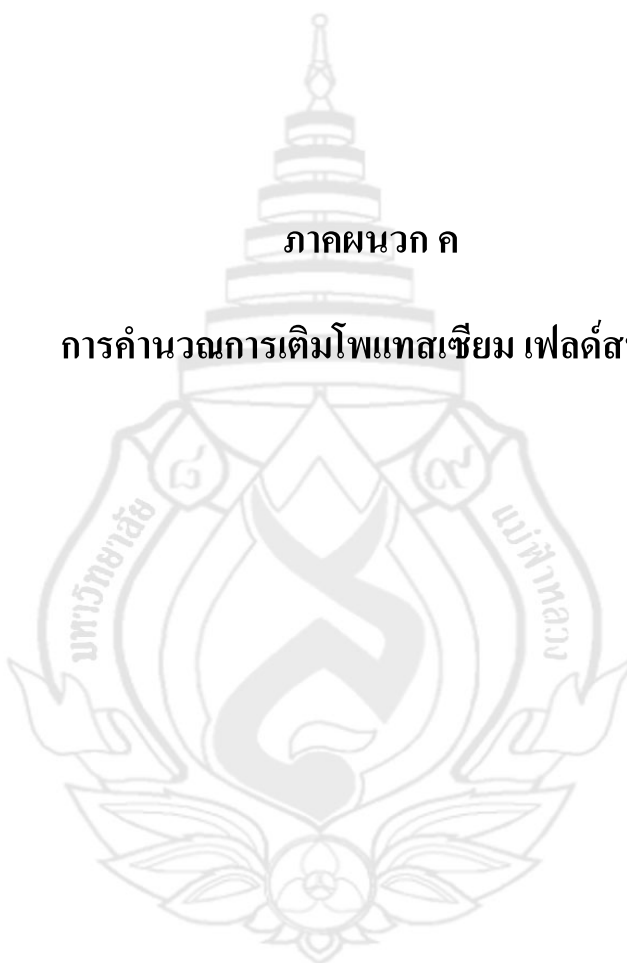
Silicon Photodiode ใช้หลักการที่ว่าเมื่อแสงตกกระทบผิว Detector ที่มีคุณสมบัติเป็น Semi-conductive จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้น

Photomultiplier tube detector ชนิดนี้ประกอบไปด้วย photo tube และ high gain amplifier ข้อดีของ Detector แบบนี้ คือสามารถปรับความไวในการตรวจวัดโดยการปรับกระแสไฟฟ้าที่ให้ และใช้วัดได้ดีในช่วง 200 – 600 นาโนเมตรแต่ถ้าความยาวคลื่นเกิน 900 นาโนเมตร ความไวในการตรวจวัดจะลดลงมาก



ภาคผนวก ค

การคำนวณการเติมโพแทสเซียม เฟลด์สปาร์



เนื่องจากเนื้อดินบอนไซมีส่วนผสมคือ ถ้ำกระดูก ดินขาว และหินคอร์นิช อย่างละ 50 และ 25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบปริมาณแร่เฟลด์สปาร์และอิลไลต์ที่เป็นตัวหลอมละลายในหินผุพบว่ามีปริมาณน้อยกว่าที่มีในหินคอร์นิช ดังตารางที่ 1 ค

ตารางที่ 1ค ตารางเปรียบเทียบปริมาณแร่ในหินผุกับหินคอร์นิชชนิดต่างๆ

ชนิดของหิน	ควอตซ์	อิลไลต์	เคโอลิไนต์	เฟลด์สปาร์	แร่อื่นๆ
หินผุ	39.60	31.08	12.90	10.48	5.94
ฮาร์ด เพอร์เฟิล	30.10	21.20	0.30	45.00	4.00
ไมด์ เพอร์เฟิล	28.20	23.50	2.70	41.00	5.00
ทรายไวต์	36.40	26.00	9.60	25.00	3.00
บัพฟัสโตน	26.40	32.70	5.80	30.00	5.00

จากตารางที่ 1ค ปริมาณตัวหลอมละลายในหินผุมีประมาณ 40 เปอร์เซ็นต์ ในหินคอร์นิชมีปริมาณตัวหลอมละลายโดยเฉลี่ยประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีมากกว่าในหินผุดังนั้นจึงต้องเติมโพแทสเซียมเฟลด์สปาร์ลงในเนื้อดินบอนไซเพื่อให้มีปริมาณตัวหลอมเท่ากับการใช้หินคอร์นิช จากอัตราส่วนผสมของเนื้อดินบอนไซมีหินคอร์นิชผสมอยู่ 25 เปอร์เซ็นต์ สามารถคำนวณหาปริมาณตัวหลอมได้ดังนี้

ในหินคอร์นิช 100 เปอร์เซ็นต์ มีปริมาณตัวหลอมละลาย 60 เปอร์เซ็นต์

ถ้าใช้หินคอร์นิช 25 เปอร์เซ็นต์ จะมีปริมาณตัวหลอมละลาย $\frac{60 \times 25}{100} = 15$ เปอร์เซ็นต์

ในหินผุ 100 เปอร์เซ็นต์ มีปริมาณตัวหลอมละลาย 40 เปอร์เซ็นต์

ถ้าใช้หินผุ 25 เปอร์เซ็นต์ จะมีปริมาณตัวหลอมละลาย $\frac{40 \times 25}{100} = 10$ เปอร์เซ็นต์

ดังนั้นในหินผุมีปริมาณตัวหลอมละลายคืออิลไลต์และเฟลด์สปาร์น้อยกว่าในหินคอร์นิชอยู่ 5 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะต้องเติมโพแทสเซียมเฟลด์สปาร์ลงไปอีก 5 เปอร์เซ็นต์ เพื่อให้ปริมาณตัวหลอมละลายมีปริมาณเท่ากันแต่เนื่องจากในหินผุมีปริมาณของแร่เคโอลิไนต์มากกว่าในหินคอร์นิชซึ่งเป็นไปได้ที่จะมีความทนไฟดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกเติมโพแทสเซียมเฟลด์สปาร์ลงไป 10 เปอร์เซ็นต์

ภาคผนวก ง

ผลการวิเคราะห์ถ้ำกระดูก



1. ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเถ้ากระดูก

MgO 1.37 %

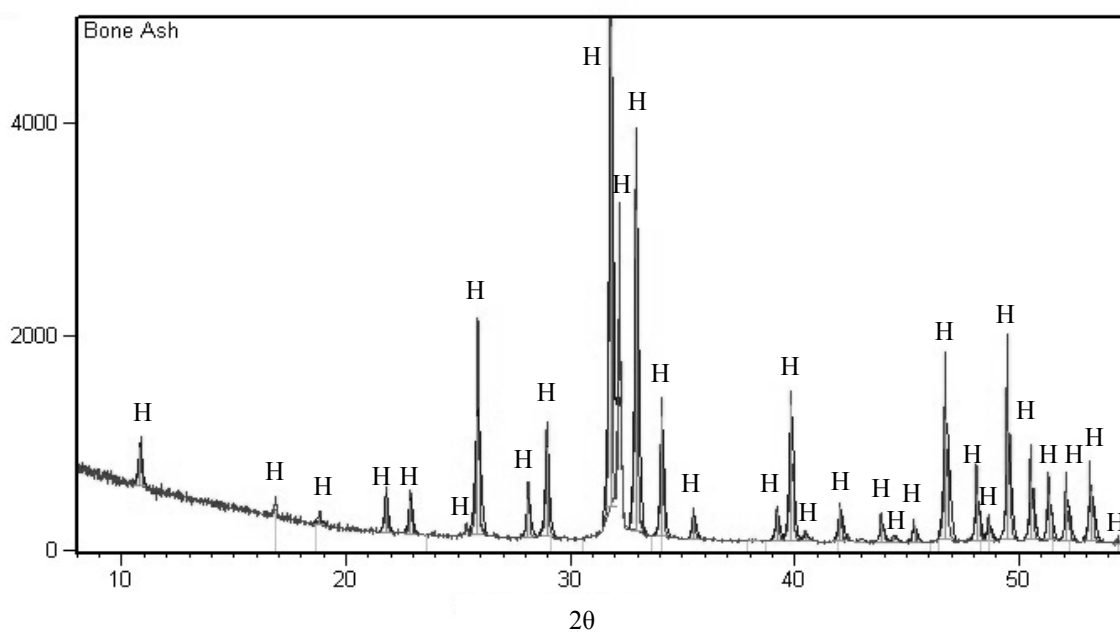
SiO₂ 1.21 %

P₂O₅ 45.02 %

CaO 52.40 %

2. ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ของเถ้ากระดูก

Counts



ภาพที่ 1ง องค์ประกอบทางแร่ของเถ้ากระดูก H = Hydroxylapatite , $(\text{Ca}(\text{OH})_2)_3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$

3. ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของไส้กระดูก



ภาพที่ 2ง การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของไส้กระดูก

ตารางที่ 1ง ผลขนาดอนุภาคของไส้กระดูก

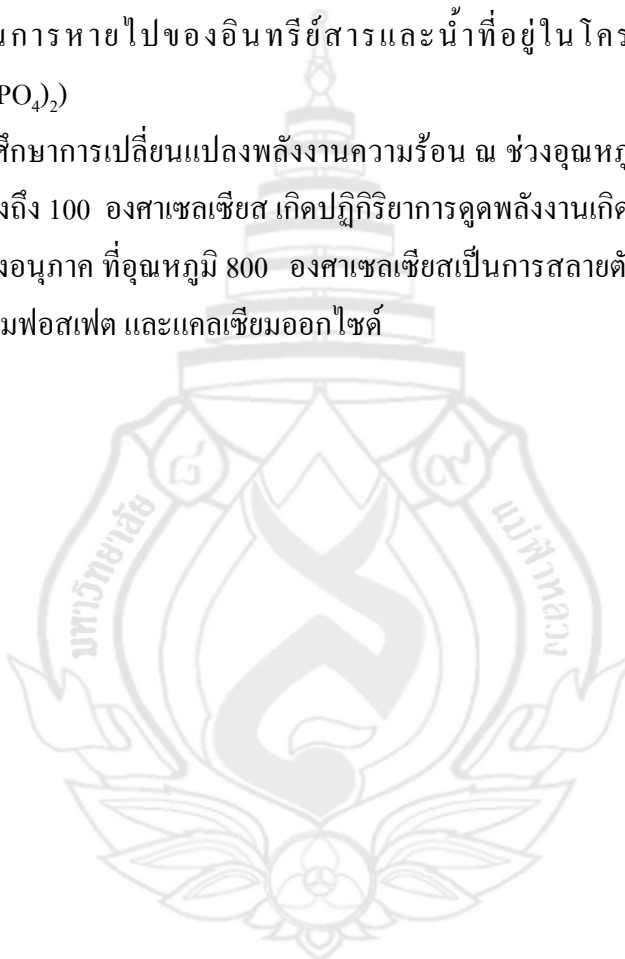
ไส้กระดูก	ขนาดอนุภาค (ไมโครเมตร)			
	D(0,1)	D(0,5)	D(0,9)	D[4,3]
	2.62	5.96	22.46	10.16

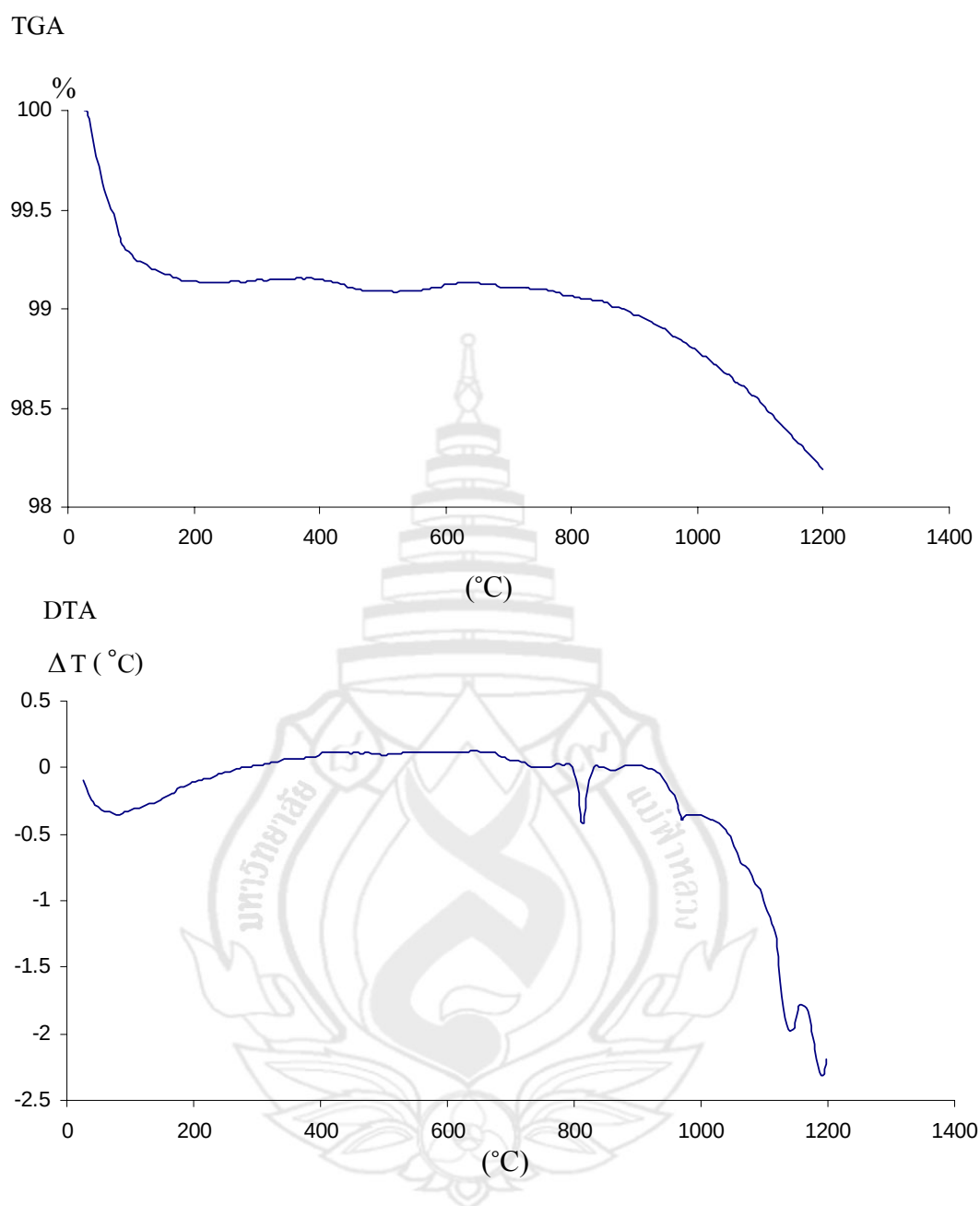
ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของไส้กระดูก มีการกระจายตัวของขนาดอนุภาค 2 ขนาดด้วยกัน ไส้กระดูกมีอนุภาคขนาดเล็กและขนาดใหญ่ปะปนกันอยู่เนื่องจากการนำไปใช้ขนาดอนุภาคจะมีผลต่อความเหนียวของเนื้อดิน การขึ้นรูป ส่งผลต่อการยุบตัวหลังการเผา

4. ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงเชิงความร้อนของเถ้ากระดูก

ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของเถ้ากระดูกโดยเทคนิค TGA เพื่อศึกษา น้ำหนักที่หายไปหลังการเผา ดังรูปที่ 3 การเปลี่ยนแปลงในช่วงอุณหภูมิห้องถึงอุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียส ผลการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น 2 ช่วง คือ ช่วงอุณหภูมิห้องถึงประมาณ 100 องศาเซลเซียส เป็นการหายไปของความชื้นระหว่างอนุภาค ส่วนช่วงที่ 2 เริ่มจากอุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นการหายไปของอินทรีย์สารและน้ำที่อยู่ใน โครงสร้างของเถ้ากระดูก ($\text{Ca}(\text{OH})_2 \cdot 3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$)

ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อน ณ ช่วงอุณหภูมิต่างๆด้วย DTA พบว่า ช่วงอุณหภูมิห้องถึง 100 องศาเซลเซียส เกิดปฏิกิริยาการดูดพลังงานเกิดการหายไปของความชื้นที่อยู่บนพื้นผิวของอนุภาค ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสเป็นการสลายตัวของไฮดรอกซีอะพาไทต์ เป็นไตรแคลเซียมฟอสเฟต และแคลเซียมออกไซด์





ภาพที่ 3ง การเปลี่ยนแปลงเชิงความร้อนของเต้ากระดุก

ประวัติผู้เขียน



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ

นางสาว กาญจนา ศรีจันทร์

วัน เดือน ปี เกิด

5 กรกฎาคม 2526

สถานที่อยู่ปัจจุบัน

มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง 333 ม.1 ต.ท่าสูด
อ.เมือง จ.เชียงราย

ประวัติการศึกษา

2548

ปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต
สาขาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเซรามิกส์
คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร

