

อิทธิพลของเจ้าหน้าที่ในต่อการแอ่นตัวของกระเบื้องเซรามิกสโตนแวร์



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีเซรามิก ภาควิชาวัสดุศาสตร์
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2561
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

INFLUENCE OF LIGNITE BOTTOM ASH ON PYROPLASTIC DEFORMATION IN STONEWARE
CERAMIC TILES



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science in Ceramic Technology

Department of Materials Science

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2018

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	อิทธิพลของเจ้าหน้าที่การตลาดต่อการแอ่นตัวของกระเบื้อง เซรามิกสโตนแวร์
โดย	นายธฤต ประสาทเสรี
สาขาวิชา	เทคโนโลยีเซรามิก
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนากร วาสนาเพียรพงศ์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	
.....	ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดุจฤทัย พงษ์เก่า คະซีมา)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนากร วาสนาเพียรพงศ์)	
.....	กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กานต์ เสรีวัลย์สถิตย์)	
.....	กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันทนี พุกกะคุปต์)	
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.จรัสพร มงคลขจิต)	

ชฎุต ประสาทเสรี : อิทธิพลของเถ้าหนักลิกไนต์ต่อการแอนตัวของกระเบื้องเซรามิกสโตนแวร์.
(INFLUENCE OF LIGNITE BOTTOM ASH ON PYROPLASTIC DEFORMATION
IN STONEWARE CERAMIC TILES) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ผศ. ดร.ธนากร วาสนาเพียรพงศ์

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลของการใช้เถ้าหนักลิกไนต์เป็นส่วนผสมในเนื้อกระเบื้องเซรามิกสโตนแวร์ ชนิดดูดซึมน้ำต่ำ ทำการขึ้นรูปขึ้นงานกระเบื้องที่มีส่วนผสมของเถ้าหนักลิกไนต์ที่มีอัตราการดูดซึมน้ำเทียบเท่ากับกระเบื้องสโตนแวร์สูตรมาตรฐาน และนำสูตรกระเบื้องที่มีส่วนผสมของเถ้าหนักลิกไนต์ที่มีการดูดซึมน้ำใกล้เคียงกับกระเบื้องสูตรมาตรฐานมาผสมในอัตราส่วนร้อยละ 10 ถึงร้อยละ 90 ของกระเบื้องดินเผาสูตรมาตรฐาน เพื่อวิเคราะห์แนวโน้มที่เกิดขึ้นจากการเติมเถ้าหนักลิกไนต์ลงในกระเบื้องดินเผาที่มีผลต่อการแอนตัวที่อุณหภูมิสูง และสมบัติที่สำคัญของกระเบื้องเซรามิกสโตนแวร์

กระเบื้องดินเผาที่มีการใช้เถ้าหนักลิกไนต์เป็นส่วนผสมมีการแอนตัวที่อุณหภูมิสูงน้อยลงตามอัตราส่วนของเถ้าหนักลิกไนต์ที่เพิ่มขึ้น กระเบื้องดินเผา (สูตร T3) ประกอบด้วยเถ้าหนักลิกไนต์ร้อยละ 50 ดินดำแม่ทานร้อยละ 30 ดินขาวลำปางร้อยละ 10 โซเดียมเฟลสปาร์ร้อยละ 5 และทรายบดร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก มีการค่าแอนตัว 1.29×10^{-6} ต่อมิลลิเมตร เทียบกับกระเบื้องสูตรมาตรฐาน (สูตร STD) ประกอบด้วย ดินดำแม่ทานร้อยละ 30 ดินขาวลำปางร้อยละ 30 หินฝูร้อยละ 30 โซเดียมเฟลสปาร์ร้อยละ 5 และทรายบดร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก มีค่าการแอนตัว 3.39×10^{-6} ต่อมิลลิเมตร เนื่องจากในเถ้าหนักลิกไนต์ มีองค์ประกอบของแคลเซียมออกไซด์เป็นตัวทำให้เกิดเฟสออนอร์ไทต์ที่มีผลกรูบเข็ม และช่วยให้ค่าการแอนตัวน้อยลงตามปริมาณของเฟสออนอร์ไทต์ที่เกิดขึ้น นอกจากนี้การเติมเถ้าหนักลิกไนต์ในอัตราส่วนที่เหมาะสมยังช่วยลดปริมาณการดูดซึมน้ำโดยกระเบื้องดินเผา (สูตร T30) ที่มีเถ้าหนักลิกไนต์ร้อยละ 15 ดินดำแม่ทานร้อยละ 30 ดินขาวลำปางร้อยละ 24 หินฝูร้อยละ 21 โซเดียมเฟลสปาร์ร้อยละ 5 และทรายบดร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก มีค่าการดูดซึมน้ำ 0.99 เปอร์เซ็นต์ เทียบกับกระเบื้องสูตรมาตรฐานที่ 3.15 เปอร์เซ็นต์

สาขาวิชา เทคโนโลยีเซรามิก

ลายมือชื่อนิสิต

ปีการศึกษา 2561

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

5772278023 : MAJOR CERAMIC TECHNOLOGY

KEYWORD: Pyroplastic Index, Anorthite, Lignite Bottom Ash, Ceramic Stoneware Tile

Tarit Prasartseree : INFLUENCE OF LIGNITE BOTTOM ASH ON PYROPLASTIC DEFORMATION IN STONEWARE CERAMIC TILES. Advisor: Asst. Prof. Dr. Thanakorn Wasanapiarnpong

This research study on the effects of lignite bottom ash as an ingredient to produce low water absorption ceramic stoneware tiles. The tiles formulated with lignite bottom ash that absorbing water close to the standard were mixed in the ratio of 10 to 90 by weight of the standard stoneware tiles. The formation was done to analyze the trend of lignite bottom ash that added into stoneware tiles by analyzing the effect on pyroplastic deformation and properties of ceramic stoneware tiles.

The stoneware tiles with lignite bottom ash content had lower pyroplastic deformation from the formula (T3) containing 50% lignite ash, 30% Mae tile ball clay, 10% Lampang kaolin, 5% sodium feldspar, and 5% milled sand which has pyroplastic deformation of $1.29 \times 10^{-6} \text{ mm}^{-1}$ compare to formula (STD) containing 30% Mae tile ball clay, 30% Lampang kaolin, 30% pottery stone, 5% sodium feldspar, and 5% milled sand which has pyroplastic deformation of $3.39 \times 10^{-6} \text{ mm}^{-1}$ because high amount of calcium oxide content cause forming anorthite phase with the needle-shaped crystals that help reduce the pyroplastic deformation. The water absorption of formula T30 containing 15% lignite ash, 30% Mae tile ball clay, 24% Lampang kaolin, 21% pottery stone, 5% sodium feldspar, and 5% milled sand was 0.99% compared to standard stoneware tile which was 3.15%.

Field of Study: Ceramic Technology

Student's Signature

Academic Year: 2018

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ลุล่วงไปด้วยดี ต้องขอขอบพระคุณ ความช่วยเหลือและสนับสนุนจากหลายภาคส่วนดังนี้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนากร วาสนาเพียรพงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ที่ให้ความรู้ ความเมตตา อบรมสั่งสอน ทั้งทางด้านงานวิจัยและการดำเนินชีวิต ตลอดจนมอบโอกาสและประสบการณ์ที่ดีอีกทั้งยังยอมรับฟังความคิดเห็น ให้อิสระในการทำงานและความเชื่อมั่นในตัวข้าพเจ้านอกจากนี้ยังสละเวลาเพื่อติดตามความก้าวหน้าของงานวิจัย และตรวจทานงาน รวมถึงให้ข้อเสนอแนะเพิ่มเติม ตลอดจนปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความเอาใจใส่อย่างดียิ่ง ทำให้โครงการวิจัยฉบับนี้มีความถูกต้อง และสมบูรณ์ยิ่งขึ้น จึงขอขอบพระคุณเป็นอย่างยิ่งจากใจจริง

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ที่ให้ความรู้ คำแนะนำต่าง ๆ เพื่อปรับปรุงแก้ไขวิทยานิพนธ์นี้ให้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

อาจารย์ภาควิชาวัสดุศาสตร์ทุกท่าน ที่ให้ความรู้ ความเมตตา ตลอดจนเจ้าหน้าที่และบุคลากรของภาควิชาวัสดุศาสตร์ ที่ให้ความช่วยเหลืออำนวยความสะดวกในทุก ๆ ด้าน ทำให้มีความทรงจำที่ดีที่ได้จากบ้านสีเทาแห่งนี้

ขอขอบพระคุณ คุณบงกช พุฒแก้ว เจ้าหน้าที่ปฏิบัติการ SEM คุณวิรพงศ์ ครพนม เจ้าหน้าที่ปฏิบัติการ XRD และครอบครัวของผู้วิจัย ที่ให้การสนับสนุน เป็นกำลังใจ และเพื่อน ๆ พี่ ๆ น้อง ๆ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ที่ความช่วยเหลือในทุก ๆ ด้าน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ธฤต ประสาทเสรี

สารบัญ

	หน้า
.....	ค
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
รายการตาราง	ฉ
รายการรูปประกอบ.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 ถ่านหิน	3
2.1.1 ถ่านหินเหมืองแม่เมาะ	3
2.1.2 ถ่านหินลิกไนต์ (Lignite)	3
2.1.3 เถ้าหนัก (bottom ash).....	4
2.1.3.1 สมบัติทางกายภาพของเถ้าหนัก	4
2.1.3.2 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าหนัก	4
2.2 เซรามิก.....	5

2.3	อุตสาหกรรมเซรามิก.....	5
2.4	อุตสาหกรรมเซรามิกของไทย.....	6
	อัตราการขยายตัวของอุตสาหกรรมเซรามิกในประเทศไทย.....	6
2.5	วัตถุดิบในการผลิตเซรามิก.....	7
2.5.1	ดิน.....	7
2.5.2	ตัวหลอมละลายในเนื้อดิน (Flux).....	11
2.5.2.1	เฟลด์สปาร์ (Feldspar).....	12
2.5.3	ตัวทนไฟ (Refractory).....	14
2.6	กระเบื้องเซรามิกสโตนแวร์.....	17
2.6.1	ความหมายของกระเบื้องตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม.....	17
2.6.2	ชนิดกระเบื้อง.....	17
2.6.3	กระบวนการผลิตกระเบื้องเซรามิก.....	18
2.6.3.1	การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เซรามิกโดยใช้แรงอัด.....	18
2.6.3.2	การอบผลิตภัณฑ์ให้แห้ง.....	19
2.6.3.3	การเผาขึ้นรูปผลิตภัณฑ์.....	21
2.6.3.4	อิทธิพลความร้อนที่มีต่อเนื้อดินปั้นผลิตภัณฑ์เซรามิก.....	21
2.6.3.5	อิทธิพลของพลังงานความร้อนที่มีต่อซิลิกา (SiO ₂).....	23
2.6.3.6	อิทธิพลของพลังงานความร้อนที่มีต่อเฟลด์สปาร์.....	25
2.6.3.7	การหดตัวและพฤติกรรมระหว่างการเผา.....	25
2.6.3.8	ตัวแปรเบื้องต้นที่มีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์เซรามิก.....	25
2.7	มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม.....	26
2.8	การแอ่นตัว (Pyroplastic Deformation).....	27
2.9	รวบรวมและทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	27

2.9.1 Preparation and characterization of red porcelain tiles with hematite tailings.....	27
2.9.2 An insight into the pyroplasticity of porcelain stoneware tiles	29
2.9.3 Pyroplasticity in porcelain tiles.....	30
2.9.4 Effect of spodumene addition on pyroplastic deformation of porcelain stoneware	32
2.9.5 Evaluation of pyroplastic deformation in sanitaryware porcelain bodies.	32
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	33
3.1 สารเคมีและวัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง.....	33
3.2 การเตรียมตัวอย่าง	35
3.2.1 การตรวจสอบส่วนประกอบทางเคมีและโครงสร้างทางจุลภาคของเก้าอี้.....	35
3.2.1.1 การตรวจสอบส่วนประกอบทางเคมีโดยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray Fluorescence).....	35
3.2.1.2 การตรวจสอบโครงสร้างผลึกโดยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน (X-ray Diffractometer).....	35
3.3 การขึ้นรูปกระเบื้องดินเผาสูตรมาตรฐาน และกระเบื้องผสมเก้าอี้ลิกไนต์อัตราส่วนร้อยละ 50	35
3.3.1 ขั้นตอนเตรียมวัตถุดิบตั้งต้น.....	35
3.3.2 ขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบเพื่อผลิตกระเบื้องสูตรมาตรฐาน และสูตรผสมเก้าอี้ร้อยละ 50.....	35
ขั้นตอนการอัดขึ้นรูปแบบแห้ง.....	36
3.3.3 การศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อกระเบื้องสูตรมาตรฐานและสูตรผสมเก้าอี้ร้อยละ 50....	37
การดูดซึมน้ำ	37
3.3.4 ขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบผลิตกระเบื้องที่ใช้สมบัติของเก้าอี้ลิกไนต์ในการดำเนินการแอนตัว.....	37
3.3.5 การศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อกระเบื้องที่ใช้สมบัติของเก้าอี้ลิกไนต์ในการดำเนินการแอนตัว.....	39

3.3.5.1 ความหนาแน่นก่อนการเผา (green density) [21]	39
3.3.5.2 การสูญเสียน้ำหนักของชิ้นงาน.....	40
3.3.5.3 การหดตัวเชิงเส้น	40
3.3.5.4 การดูดซึมน้ำ	41
3.3.5.5 สมบัติการต้านการแอ่นตัว	41
3.3.5.6 7 ความต้านแรงดัดโค้งหลังการเผา	42
3.3.5.7 โครงสร้างจุลภาค.....	43
3.4 แผนผังงานวิจัย	44
3.4.1 แผนผังการเตรียมและทดสอบชิ้นงานกระเบื้องสูตรมาตรฐานและสูตรผสมเถ้าหนักร้อยละ 50	44
3.4.2 แผนผังการเตรียมและทดสอบชิ้นงานกระเบื้องที่ใช้สมบัติของเถ้าหนักลิกลินต์ในการต้านการแอ่นตัว.....	45
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล.....	46
4.1 ผลการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าหนักลิกลินต์เทียบกับดินดำ	46
4.2 ผลการศึกษาโครงสร้างผลึกของเถ้าหนักลิกลินต์	46
4.3 ผลการศึกษาการขึ้นรูปกระเบื้องดินเผาสูตรมาตรฐานและกระเบื้องที่มีเถ้าหนักลิกลินต์ผสมในอัตราส่วนร้อยละ 50.....	47
4.4 ผลการดูดซึมน้ำของกระเบื้องดินเผาสูตรมาตรฐานและกระเบื้องที่มีเถ้าหนักลิกลินต์ผสมในอัตราส่วนร้อยละ 50.....	47
4.5 ผลการศึกษาการขึ้นรูปกระเบื้องที่ใช้สมบัติของเถ้าหนักลิกลินต์ในการต้านการแอ่นตัว.....	48
4.6 ผลการศึกษาความหนาแน่นก่อนการเผา	49
4.7 ผลการศึกษาการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นงาน	49
4.8 ผลการศึกษาการหดตัวเชิงเส้น	50
4.9 ผลการศึกษาการดูดซึมน้ำ.....	51
4.10 ผลการศึกษาสมบัติการต้านการแอ่นตัว	51

4.11 ผลการศึกษาสมบัตินักเรียนด้านการอ่านตัวเทียบรูปพจนานุกรม.....	52
4.12 ผลการศึกษาความต้านแรงดัดโค้งหลังการเผา.....	53
4.13 ผลการศึกษาโครงสร้างผลึกของเก้าอี้เหล็กไนต์.....	54
4.14 ผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาค.....	55
4.14.1 กระเบื้องดินเผาสูตรมาตรฐาน STD.....	55
4.14.2 กระเบื้องที่มีเก้าอี้เหล็กไนต์ผสม T3 ผสมอยู่อัตราส่วนร้อยละ 20.....	57
4.14.3 กระเบื้องที่มีเก้าอี้เหล็กไนต์ผสม T3 ผสมอยู่อัตราส่วนร้อยละ 40.....	61
4.14.4 กระเบื้องที่มีเก้าอี้เหล็กไนต์ที่ผสม T3 อัตราส่วนร้อยละ 60.....	63
4.14.5 กระเบื้องที่มีเก้าอี้เหล็กไนต์ที่ผสม T3 อัตราส่วนร้อยละ 80.....	66
4.14.6 กระเบื้องที่มีเก้าอี้เหล็กไนต์ผสมสูตร T3.....	69
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	73
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	73
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	73
บรรณานุกรม.....	74
ภาคผนวก.....	78
ประวัติผู้เขียน.....	90

รายการตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของถ่านหินลิกไนต์ของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) [3].....	5
ตารางที่ 2.2 สมบัติต่าง ๆ ของดินขาว[7].....	8
ตารางที่ 2.3 ข้อดีและข้อเสียของดินดำ[7].....	11
ตารางที่ 2.4 สมบัติทางกายภาพของเฟลด์สปาร์[7].....	13
ตารางที่ 2.5 ส่วนประกอบทางเคมีของเฟลด์สปาร์[5].....	14
ตารางที่ 2.6 สมบัติทางกายภาพของซิลิกา[7].....	15
ตารางที่ 2.7 สมบัติทางกายภาพของอะลูมินา[7].....	16
ตารางที่ 2.8 แสดงส่วนประกอบในเนื้อผลิตภัณฑ์ที่สุกตัวที่อุณหภูมิต่าง ๆ[5].....	23
ตารางที่ 2.9 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุตั้งต้นที่ใช้เป็นส่วนผสม (wt%).....	28
ตารางที่ 2.10 สูตรส่วนผสมของ P-1 ถึง P-5.....	28
ตารางที่ 2.11 ส่วนผสมเพื่อทดสอบความแตกต่างของการใช้ผงขนาดเล็กและขนาดใหญ่.....	30
ตารางที่ 2.12 ผลการทดลองค่าการแอนตัว ความหนืดของเฟสของเหลว อัตราการดูดซึมน้ำ.....	30
ตารางที่ 2.13 แสดงอัตราส่วนผสมที่ใช้ในการทดลอง.....	31
ตารางที่ 3.1 รายละเอียดสารเคมีที่ใช้ในการขึ้นรูปกระเบื้องดินเผาจากถ่านหินลิกไนต์.....	34
ตารางที่ 3.2 รายละเอียดเครื่องมือที่ใช้ในการขึ้นรูปกระเบื้องดินเผาจากถ่านหินลิกไนต์.....	34
ตารางที่ 3.3 รายละเอียดสารเคมีที่ใช้ในการขึ้นรูปกระเบื้องดินเผาจากถ่านหินลิกไนต์.....	36
ตารางที่ 3.4 รายละเอียดสารเคมีที่ใช้ในการขึ้นรูปกระเบื้องดินเผาจากถ่านหินลิกไนต์.....	38
ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของถ่านหินลิกไนต์ และ ดินดำแม่เมาะ.....	46

รายการรูปประกอบ

	หน้า
รูปที่ 2.1 แผนผังวัตถุดิบบางชนิดในการผลิตเซรามิก[7]	7
รูปที่ 2.2 ปฏิกิริยาของดินขาว เมื่อผ่านอุณหภูมิต่างๆ และการเปลี่ยนแปลงผลึกทาง[7]	9
รูปที่ 2.3 ปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงของผลึกซิลิกาเมื่อได้รับความร้อน[7].....	15
รูปที่ 2.4 อัตราการดูดซึมน้ำของชิ้นงานที่อุณหภูมิ 1150 ถึง 1250°C [11].....	29
รูปที่ 2.6 การวิเคราะห์ SEM ของชิ้นงาน P-1(A1, A2), P-3(B1, B2), P-5(C1, C2) [11].....	29
รูปที่ 2.6 อัตราส่วนของ Albite ต่อการเกิด Pyroplasticity Index [10].....	31



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การผลิตกระแสไฟฟ้าที่โรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ใช้ถ่านหินลิกไนต์เป็นเชื้อเพลิง เกิดผลผลิตพลอยได้เป็นถ่านลิกไนต์ชนิดถ่านลอยออกมาประมาณ 3.0 ถึง 3.5 ล้านตันต่อปี และ ถ่านหนักประมาณ 1.5 ถึง 2.0 ล้านตันต่อปี^[1] ในส่วนของถ่านลอยมีการศึกษาค้นคว้าวิจัยถึงการนำไปใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลายโดยเฉพาะการนำไปใช้งานด้านคอนกรีต แต่สำหรับถ่านหนักยังไม่มีการนำไปใช้ประโยชน์มากนัก เมื่อพิจารณาองค์ประกอบเฟสที่มี ควอตซ์ อนุกริไทต์ และฮีมาไทต์ พบว่ามีองค์ประกอบทางเคมีที่น่าจะเหมาะสมสำหรับนำมาใช้ทดแทนวัสดุดิบในกระเบื้องเซรามิก

โดยทั่วไปกระเบื้องประเภทสโตนแวร์จะประกอบไปด้วยโครงสร้างผลึกหลักๆ คือ ควอตซ์ มุลไลต์ เฟลด์สปาร์ และเฟสแก้ว อุตสาหกรรมกระเบื้องเซรามิกประเภทสโตนแวร์ดูดซึมน้ำต่ำกว่าร้อยละ 3 ต้องการเนื้อกระเบื้องที่มีความแข็งแรงมีความทนไฟพอสมควรไม่แฉ่นตัวง่าย ซึ่งการผลิตกระเบื้องประเภทนี้จะใช้กระบวนการเผา ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกและการเกิดเฟสแก้วในเนื้อกระเบื้องขึ้นระหว่างการให้ความร้อนในการเผา ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้เอง จะส่งผลให้กระเบื้องนั้นมักเกิดการแฉ่นตัวหรือโก่งงอ การแฉ่นตัวมากหรือน้อยนั้นขึ้นกับค่าความหนืดของเฟสแก้วที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงในเนื้อกระเบื้อง ยิ่งมีความหนืดน้อยอัตราการแฉ่นตัวก็จะยิ่งสูงขึ้น ส่งผลต่อมิติรูปทรงและคุณภาพของชิ้นงาน

มีงานวิจัยที่รายงานว่าเฟสอนุกริไทต์ช่วยเพิ่มความหนืดของเฟสของเหลวหรือเฟสแก้วเมื่อกระเบื้องเผาที่อุณหภูมิสูง ช่วยลดการแฉ่นตัว และยังช่วยให้เกิดความหนาแน่นโดยรวมที่ดี และการดูดซึมน้ำต่ำ^[2]

งานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะศึกษาผลของการใช้ถ่านหนักลิกไนต์เป็นส่วนผสมในเนื้อกระเบื้องเซรามิกชนิดดูดซึมน้ำต่ำ โดยการวิเคราะห์ผลที่มีต่อการแฉ่นตัว และสมบัติที่สำคัญของกระเบื้องเซรามิก

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อพัฒนาสูตรส่วนผสมและการศึกษาสมบัติของกระเบื้องเซรามิกที่ใช้เถ้าหนักลิกลินต์เป็นวัตถุดิบทดแทนเปรียบเทียบกับกระเบื้องเซรามิกมาตรฐาน

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 พัฒนาหาสูตรส่วนผสมที่มีสมบัติการดูดซึมน้ำใกล้เคียงกับกระเบื้องเซรามิกมาตรฐาน

1.3.2 แบ่งอัตราส่วนของกระเบื้องดินเผาที่มีเถ้าหนักลิกลินต์ผสมและมีการดูดซึมน้ำใกล้เคียงผสมกับกระเบื้องเซรามิกมาตรฐาน

1.3.3 เียบการดูดซึมน้ำ การแอนตัว ดัชนีการแอนตัว ของกระเบื้องที่มีเถ้าหนักลิกลินต์ผสมในอัตราส่วนต่าง ๆ กับกระเบื้องดินเผาสูตรมาตรฐาน

1.3.4 ศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของกระเบื้องที่เปลี่ยนแปลงไป เมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าหนักลิกลินต์ในส่วนผสม

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้สูตรส่วนผสมเนื้อกระเบื้องเซรามิกสโตนแวร์ที่ใช้เถ้าหนักลิกลินต์เป็นส่วนผสมที่มีการแอนตัวน้อยลง

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ถ่านหิน

ถ่านหิน คือ หินตะกอนชนิดหนึ่ง และเป็นแร่เชื้อเพลิงสามารถติดไฟได้ มีสีน้ำตาลอ่อนจนถึงสีดำ มีความเปราะรอยแตกเว้าคล้ายกันหอยมีทั้งชนิดผิวมันและผิวด้าน มีน้ำหนักเบา ถ่านหินประกอบด้วยธาตุที่สำคัญ 4 อย่างได้แก่ คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และออกซิเจน นอกจากนี้มีธาตุหรือสารอื่น เช่น กำมะถัน เจือปนเล็กน้อย ถ่านหินที่มีจำนวนคาร์บอนสูงและมีธาตุอื่นต่ำ เมื่อนำมาเผาจะให้ความร้อนมาก ถือว่าเป็นถ่านหินคุณภาพดี[1]

2.1.1 ถ่านหินเหมืองแม่เมาะ

เหมืองแม่เมาะได้เริ่มผลิตถ่านหินตั้งแต่ปี พ.ศ. 2498 โดยการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยที่ ต.บ้านดง อ.แม่เมาะ จ.ลำปาง และสามารถผลิตถ่านหินให้โรงไฟฟ้าตั้งแต่ปี พ.ศ. 2498 จนถึงสิ้นปี พ.ศ. 2527 รวมประมาณ 10.373 ล้านตัน และยังทำงานต่อจนถึง ณ ปัจจุบัน ถ่านหินในแอ่งแม่เมาะนี้ จัดอยู่ในชั้นลิกไนต์ และบางส่วนเป็นซับบิทูมินัส แหล่งลิกไนต์ที่พบเกิดในแอ่งรูปกระหะหงายในยุคเทอร์เชียรี (Tertiary) ด้านทิศเหนือเป็นหิน ควอร์ตไซต์ ด้านตะวันออกและตะวันตกเป็นหินปูน ด้านใต้เป็นหินบะซอลท์ วางตัวบนหินปูน เปลือกดินชั้นบนเป็นดินเหนียวและหินลูกรังหนาประมาณ 10 เมตร ส่วนชั้นถัดลงไปเป็นดินเหนียวแข็ง หินดินดาน หรือ หินโคลน วางตัวอยู่บนชั้นถ่านหินลิกไนต์ [3] ปริมาณถ่านที่สำรวจพบในปี พ.ศ.2555 ประมาณ 1,200 ล้านตัน สามารถขุดมาใช้ประโยชน์ในราคา ที่คุ้มค่าประมาณ 400 ล้านบาท ในการเดินเครื่องโรงไฟฟ้าหน่วยที่ 1-13 จะใช้ถ่านหินประมาณวันละ 60,000 ตัน[3]

2.1.2 ถ่านหินลิกไนต์ (Lignite)

ส่วนประกอบลิกไนต์ แยกเป็นส่วนสำคัญ 2 ส่วนคือ ส่วนที่ลุกไหม้ (Combustible) และส่วนที่เป็นเถ้า (Ash) ปริมาณความร้อนของเชื้อเพลิงจะได้จากส่วนที่ลุกไหม้ ส่วนที่เป็นเถ้าคือส่วนที่เหลือจากกระบวนการลุกไหม้ซึ่งท้ายที่สุดต้องระบายออกจากเตาและพื้นที่โรงไฟฟ้า^[4]

เถ้า คือส่วนประกอบเป็นสารอนินทรีย์ออกไซด์ของแร่ธาตุที่ถูกความร้อนสูงในการเผาไหม้มาแล้ว เพราะฉะนั้น เถ้าที่ได้จากเตาอาจมีส่วนประกอบแตกต่างจากแร่ธาตุเดิมในถ่านตามธรรมชาติ เถ้าลิกไนต์เกิดจากส่วนประกอบสำคัญ 2 ส่วน คือ

1. แร่ธาตุ ได้แก่ แร่ธาตุนินทรีย์ ที่มีอยู่ในเนื้อไม้โบราณ และที่แทรกซึมเข้าไประหว่างการทับถม จนกลายเป็นถ่านหิน

2. หินดินดาน ได้แก่ ชั้นดินที่ปิดทับแนวถ่านลิกไนต์ และที่แทรกอยู่ระหว่างชั้นถ่าน เมื่อผ่านกระบวนการบดแล้วอาจคัดออกไม่ได้หมด ส่วนประกอบที่สำคัญที่สุดของ หินดินดาน คือ แคลเซียมและซิลิกาซึ่งเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของถ่านลิกไนต์

ถ่านประกอบไปด้วยถ่านหนัก (bottom ash) และถ่านลอย (fly ash) โดยถ่านลอยจะเป็นส่วนถ่านที่ลอยเป็นฝุ่น ส่วนถ่านหนักจะเป็นส่วนที่เป็นของแข็งที่เกาะข้างผนังเตาเผา

2.1.3 ถ่านหนัก (bottom ash)

ถ่านหนัก คือ ถ่านที่ได้หลังจากการเผาถ่านหิน ซึ่งเกิดมาจากการที่อนุภาคของถ่านที่เหลือจากการเผาไหม้ปะทะกันเป็นเม็ด หรือเป็นก้อนโต หรือมีบางส่วนของถ่านซึ่งปะทะกับผนังเตาและหลอมติดกันเป็นก้อนขนาดใหญ่ เมื่อมีน้ำหนักรวมกันมากขึ้นจะหล่นลงสู่ก้นเตา ซึ่งถ่านหนักมีปริมาณร้อยละ 15-25 โดยน้ำหนักของถ่านถ่านหินทั้งหมด

2.1.3.1 สมบัติทางกายภาพของถ่านหนัก

ถ่านหนักมีสีดำ โดยเม็ดอนุภาคของถ่านหนักมีลักษณะที่เป็นพื้นที่ผิวที่มีรูพรุน มีความถ่วงจำเพาะอยู่ในช่วง 2.1-2.7 มีความหนาแน่นรวม (bulk density) เป็น 1,000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และมีความหนาแน่นสูงสุด (maximum density) เป็น 1,620 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งส่วนมากถ่านหนักจะมีการกระจายขนาดอนุภาคอยู่ในช่วงของเม็ดทราย (sand-sized) โดยที่ 50-90% สามารถร่อนผ่านตะแกรงขนาด 4 เมช ซึ่งมีขนาดเล็กลงกว่า 4.75 มิลลิเมตร 10-60% สามารถร่อนผ่านตะแกรงขนาด 200 เมช ซึ่งมีขนาดเล็กลงกว่า 0.075 มิลลิเมตร[3]

2.1.3.2 องค์ประกอบทางเคมีของถ่านหนัก

องค์ประกอบทางเคมีของถ่านหนักส่วนใหญ่จะเป็น ซิลิกา (silica), อะลูมินา (alumina), เหล็กออกไซด์ (iron oxide), และ แคลเซียมออกไซด์ (calcium oxide) ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของเก้าอี้เหล็กไนต์ของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) [3]

องค์ประกอบทางเคมี	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
SiO ₂	40.57
Al ₂ O ₃	21.94
TiO ₂	0.48
Fe ₂ O ₃	9.65
CaO	20.26
MgO	2.9
Na ₂ O	0.88
K ₂ O	2.82
P ₂ O ₅	0.21
SO ₃	0.19

2.2 เซรามิก

ในสมัยแรกเป็นที่เข้าใจกันว่า คำว่า เซรามิก (Ceramic) หมายถึง ศิลปะที่เกี่ยวข้องกับเครื่องปั้นดินเผา ต่อมาได้มีการใช้ในความหมายกว้างขึ้น คือรวมถึงอุตสาหกรรมทั้งหลายที่ใช้สารประกอบพวกซิลิเกต (Silicate) ในการผลิตผลิตภัณฑ์ คำว่า “เซรามิก” มีรากศัพท์มาจากภาษากรีก “เครามอส” (Keramos) และมีรากศัพท์มาจากภาษาสันสกฤต (Sanskrit) ซึ่งมีความหมายว่า “เผา” ปัจจุบันเซรามิกมีความหมาย 2 ประการ คือ ประการแรก หมายถึงผลิตภัณฑ์ซึ่งกรรมวิธีการผลิตต้องผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูง ส่วนประการที่สอง หมายถึงผลิตภัณฑ์ซึ่งส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์ทั้งหมดหรือส่วนใหญ่ผลิตจากวัตถุดิบที่มีอยู่ตามธรรมชาติบนเปลือกโลก[5]

2.3 อุตสาหกรรมเซรามิก

อุตสาหกรรมเซรามิกมักเป็นอุตสาหกรรมขนาดใหญ่และมีความสำคัญในทุกประเทศสมบัติเฉพาะที่สำคัญของอุตสาหกรรมเซรามิกคือ เป็นอุตสาหกรรมพื้นฐานรองรับอุตสาหกรรมอื่นๆ ตัวอย่างเช่น วัตถุดิบไฟชนิดต่างๆ เป็นวัสดุพื้นฐานของอุตสาหกรรมถลุงและผลิตโลหะต่างๆ วัสดุขั้วถุก็เป็นสิ่งจำเป็นสำหรับอุตสาหกรรมเครื่องจักร เครื่องมือ และอุตสาหกรรมการผลิตรถยนต์ ผลิตภัณฑ์

แก้วมีความสำคัญต่ออุตสาหกรรมผลิตรถยนต์ สถาปัตยกรรม อิเล็กทรอนิกส์และไฟฟ้า ซีเมนต์มีความสำคัญต่อสถาปัตยกรรมและการก่อสร้าง เป็นต้น ทั้งนี้เพราะว่าผลิตภัณฑ์เซรามิกมีสมบัติทั้งทางเคมี ไฟฟ้า กลศาสตร์ ความร้อน และโครงสร้างที่เป็นประโยชน์

2.4 อุตสาหกรรมเซรามิกของไทย

การผลิตเซรามิกในประเทศไทยแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ คือ เซรามิกแบบดั้งเดิม (Traditional ceramics) และเซรามิกยุคใหม่ (New ceramics) โดยในส่วนของเซรามิกแบบดั้งเดิมนั้น เป็นกลุ่มของเซรามิกที่เน้นการใช้แรงงานในการผลิตค่อนข้างมาก และสามารถพึ่งตนเองได้เป็นส่วนใหญ่ทั้งในเรื่องของวัตถุดิบและเทคโนโลยีการผลิต ประกอบด้วยผลิตภัณฑ์ 5 ประเภทหลักได้แก่ เครื่องสุขภัณฑ์ กระเบื้องเซรามิก เครื่องใช้บนโต๊ะอาหาร ของชำร่วยและเครื่องประดับ และลูกถ้วยไฟฟ้า ส่วนผลิตภัณฑ์เซรามิกยุคใหม่เป็นผลิตภัณฑ์ที่ไทยยังขาดเทคโนโลยีและปริมาณการใช้ในประเทศยังไม่มีมากนัก ดังนั้นจึงไม่มีการพัฒนาไปสู่การผลิตที่ใช้เทคโนโลยีในขั้นที่สูงขึ้นได้ เซรามิกประเภทนี้จะใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์คอมพิวเตอร์ และเป็นเครื่องมือในการแพทย์ เช่น คาปาซิเตอร์เซรามิก และหม้อแปลงไฟฟ้าเซรามิก เป็นต้น อุตสาหกรรมเซรามิกเป็นอีกหนึ่งในอุตสาหกรรมพื้นฐานหลัก เป็นอุตสาหกรรมที่สนองนโยบายของรัฐในการสร้างงานและกระจายรายได้ไปสู่ภูมิภาค จึงนับว่าเป็นอุตสาหกรรมที่มีความสำคัญอีกอุตสาหกรรมหนึ่ง

อัตราการขยายตัวของอุตสาหกรรมเซรามิกในประเทศไทย

การผลิตเซรามิก ไตรมาสที่ 3 ปี 2548 กระเบื้องปูพื้น บุผนัง มีปริมาณ 40.88 ล้านตารางเมตร เมื่อเทียบกับไตรมาสก่อน และเทียบกับระยะเดียวกันของปีก่อน มีอัตราการขยายตัวเพิ่มขึ้นร้อยละ 4.6 และ 12.98 ตามลำดับ การจำหน่ายเซรามิกในระยะเวลาเดียวกันของกระเบื้องปูพื้นบุผนัง มีปริมาณ 39.84 ล้านตารางเมตร ซึ่งมีปริมาณลดลงเมื่อเทียบกับไตรมาสก่อนเนื่องจากความต้องการใช้เซรามิกลดลงจากการชะลอตัวของธุรกิจอสังหาริมทรัพย์ในประเทศ และเป็นช่วงหน้าฝนที่ไม่ใช่ฤดูกาลขาย แต่เมื่อเทียบกับระยะเดียวกันของปีก่อน การจำหน่ายกระเบื้องปูพื้นบุผนัง ยังคงมีการขยายตัวเพิ่มขึ้นแม้จะไม่เท่ากับปีที่ผ่านมา ซึ่งมีอัตราการขยายตัวเพิ่มขึ้น ร้อยละ 8.72 การส่งออกผลิตภัณฑ์เซรามิกในช่วงระยะเวลาเดียวกันมีมูลค่ารวม 171.7 ล้านเหรียญสหรัฐฯ เมื่อเทียบกับไตรมาสก่อน และเทียบกับระยะเดียวกันของปีก่อน มีอัตราการขยายตัวเพิ่มขึ้นร้อยละ 0.47 และ 22.29 ตามลำดับ ในส่วนของการนำเข้าผลิตภัณฑ์เซรามิกส่วนใหญ่จะนำเข้าจากประเทศญี่ปุ่น มาเลเซีย อิตาลี อินโดนีเซีย และจีน โดยการนำเข้าผลิตภัณฑ์เซรามิกมีมูลค่า 45.2 ล้านเหรียญสหรัฐฯ เมื่อเทียบกับไตรมาสก่อน และเทียบกับระยะเดียวกันของปีก่อนมีอัตราการขยายตัวเพิ่มขึ้นร้อยละ 9.71 และ 18.64 ตามลำดับ ซึ่งการนำเข้าผลิตภัณฑ์เซรามิกสำหรับใช้ตามห้องปฏิบัติการต้องนำเข้าสินค้า

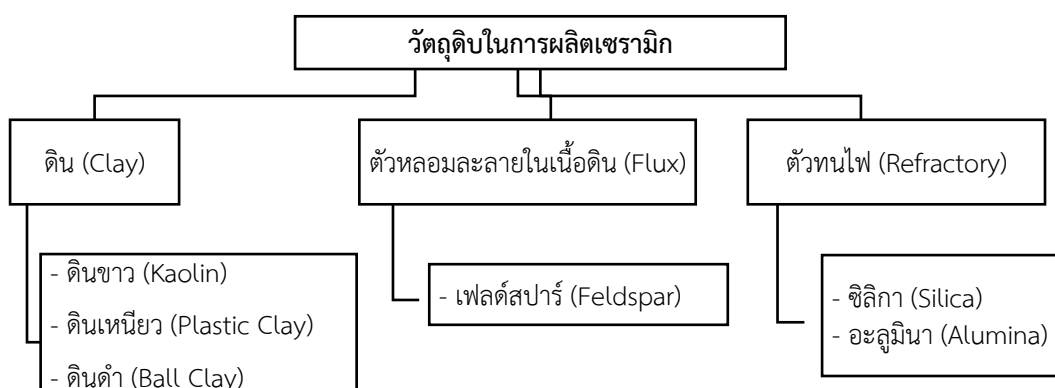
คุณภาพสูงจากญี่ปุ่น มาเลเซีย และอิตาลีและการนำเข้าผลิตภัณฑ์เซรามิกอื่นส่วนใหญ่จะเป็นการนำเข้ากระเบื้องปูพื้น บุผนัง ที่มีราคาถูกจากจีน^[6]

2.5 วัตถุดิบในการผลิตเซรามิก

วัตถุดิบที่ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตเซรามิกบางอย่างได้มาจากสินแร่ตามธรรมชาติ เช่น ดินต่างๆ (Clays) เฟลด์สปาร์ (Feldspar) หินควอตซ์ (Quartz) และทรายทะเล เป็นต้น นอกจากนี้วัตถุดิบบางอย่างได้จากการสกัดจากสินแร่ตามธรรมชาติ และนำมาทำให้บริสุทธิ์ด้วยกระบวนการทางเคมี เช่น อะลูมินา (Alumina) ซึ่งได้จากแร่บอกไซต์ (Bauxite) ที่ได้จากการสังเคราะห์นอกจากนี้ยังมีเฟอร์ไรต์ (Ferrites) และสารอินทรีย์บางชนิดที่ใช้เป็นตัวช่วยในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เซรามิกสมัยใหม่ ต้องการวัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการผลิตที่มีเปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์สูงเพราะสิ่งสกปรกเพียงเล็กน้อยซึ่งอาจน้อยกว่า 1 เปอร์เซ็นต์ ก็มีอิทธิพลต่อโครงสร้างซึ่งเชื่อมโยงไปถึงคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์นั้น ๆ ด้วย^[5] ผลิตภัณฑ์เซรามิกทำมาจากวัตถุดิบทนไฟพวกอนินทรีย์สาร ซึ่งมีอยู่มากมายหลายชนิดตามอุณหภูมิการเผา สามารถเลือกใช้ให้เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ ในระบบอุตสาหกรรมเครื่องปั้นดินเผา นิยมแบ่งวัตถุดิบในการผลิตเซรามิกออกเป็น 3 กลุ่ม คือ ดิน ตัวหลอมละลายในเนื้อดิน และตัวทนไฟ ดังแสดงในรูปที่ 2.1

2.5.1 ดิน

ดินเป็นวัตถุดิบที่สำคัญในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เซรามิกที่มีความเหนียว เมื่อถูกน้ำจะจับตัวเป็นก้อน สามารถนำมาปั้นเป็นรูปร่างต่าง ๆ ได้ง่าย ความเหนียวและสีของดินมีลักษณะแตกต่างกันไปในแต่ละแหล่ง ทั้งในด้านโครงสร้างผลึกของดิน และคุณสมบัติภายหลังการเผา เช่นสี การหดตัว ความแข็งแรง และความทนไฟ เป็นต้น



รูปที่ 2.1 แผนผังวัตถุดิบบางชนิดในการผลิตเซรามิก^[7]

แร่ดินที่ใช้เตรียมเนื้อดินในอุตสาหกรรมเซรามิก ได้แก่

2.5.1.1 ดินขาว (Kaolin, China clay)

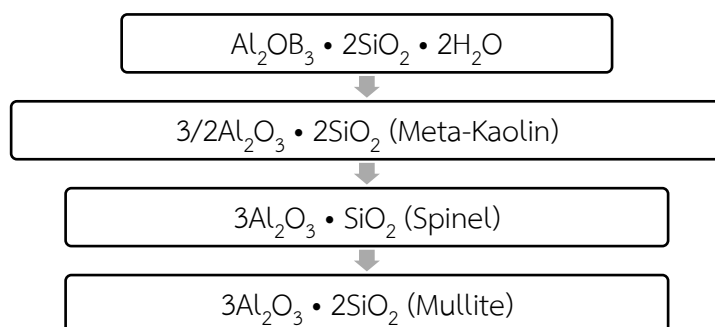
ดินขาวส่วนใหญ่เป็นดินที่เกิดอยู่ในแหล่งผุพังของหินเดิม (Residual clay) เป็นดินที่มีขนาดเม็ดหยาบจึงมีความเหนียวน้อย ประกอบด้วยแร่โคโลลิไนต์ (Kaolinite) มากกว่าดินชนิดอื่นๆ ดินขาวที่พบตามแหล่งที่ส่วนประกอบต่างกันด้วยเหตุผล 2 ประการ คือ เนื่องจากโครงสร้างของดินขาวมีการแทนที่กันของโลหะธาตุที่มีประจุบวกและเนื่องจากมีสารประกอบอื่นปะปนอยู่ ได้แก่ ควอตซ์ (Quartz) เฟลด์สปาร์ (Feldspar) ฮีมาไทท์ (Hematite) และ ฟลูออไรต์ (Fluorite) เป็นต้นดินขาวที่ขุดขึ้นมาใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ มีอยู่ 3 ชนิด คือ

- ดินขาวที่มีความบริสุทธิ์และความทนไฟสูง สามารถนำมาใช้ทำผลิตภัณฑ์เครื่องปั้นดินเผาได้
- ดินขาวที่เป็นเกรดของฟิลเลอร์ที่ใช้ในอุตสาหกรรมกระดาษ ทำสี ทำยาง ยาฆ่าแมลง ปูน และอื่นๆ โดยใช้ดินขาวที่มีเนื้อสีขาวบริสุทธิ์ตามผลการวิเคราะห์ทางเคมี แต่ไม่ได้นำไปเผาผ่านความร้อนในกระบวนการผลิต
- ดินขาวซึ่งเป็นดินซอฟซึ่งไม่ใช่ดินขาว แต่เป็นปูนขาวซอล์ก (Chalk) หรือแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) เกิดจากผลึกของหินปูนตามธรรมชาติที่มีลักษณะเป็นผลึกละเอียดสีขาว บางครั้งสีอมชมพูและน้ำตาลอ่อน ซึ่งใช้เป็นเนื้อดินปั้นขึ้นรูป ไม่ได้ใช้ผสมทำปูนซีเมนต์

ตารางที่ 2.2 สมบัติต่าง ๆ ของดินขาว[7]

สูตรดินขาว (wt%)	$\text{Al}_2\text{O}_3(39.5\%)\cdot 2\text{SiO}_2(46.5\%)\cdot 2\text{H}_2\text{O}(14\%)$
รูปผลึก	เป็นแผ่นหกเหลี่ยม เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5-10.0 ไมครอน
ความเหนียว	ต่ำ เมื่อเทียบกับดินดำ
ความทนไฟ	1750-1770 °C
ความหดตัว	น้อย เมื่อเทียบกับดินดำ
ความแข็งแรงหลังเผา	สูง เมื่อเทียบกับดินดำ

สมบัติทางเคมีของดินขาว มีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการเรียงตัวของผลึกในโครงสร้างตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ทำให้เกิดเป็นโครงสร้างที่มีความแข็งแรงขึ้น



รูปที่ 2.2 ปฏิกิริยาของดินขาว เมื่อผ่านอุณหภูมิต่างๆ และการเปลี่ยนแปลงผลึกทาง[7]

สมบัติทางกายภาพของดินขาว (Physical properties of kaolin)

- ขนาดของอนุภาค (Particle size) ขนาดของอนุภาคดินจะมีผลต่อความเหนียว (Plasticity) และการหดตัวของเนื้อดินปั้นเมื่อแห้ง (Dry shrinkage) ดินเม็ดละเอียดจะให้ความเหนียวและการหดตัวเมื่อแห้งมากกว่าเม็ดหยาบ ดินที่มีเม็ดหยาบจะมีความเหนียวน้อย (Low plasticity)

- รูปร่างของอนุภาค (Particle shape) รูปร่างของแร่เคโอลินต์ทั่วไปจะเป็นแผ่นหกเหลี่ยม (Hexagonal plates) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 0.05-10.0 ไมครอน โดยเฉลี่ยขนาดอยู่ระหว่าง 0.5 ไมครอน

- สมบัติในการแลกเปลี่ยนอนุมูล (Base exchange capacity) ปกติดินขาวที่บริสุทธิ์จะไม่มี การแลกเปลี่ยนอนุมูล หรือดูดซับอนุภาคและโมเลกุลอื่นๆ แต่ถ้าไม่บริสุทธิ์จะเกิดการแลกเปลี่ยน อนุมูล หรือดูดซับเอาผลึกของแร่ที่มีขนาดเล็กไว้ที่ผิว ผลึกเคโอลินต์บริสุทธิ์มีโครงสร้างผลึกที่แข็งแรง แร่ธาตุและอินทรีย์สารแทรกเข้าไปในโครงสร้างผลึกไม่ได้จึงคงความบริสุทธิ์ได้ดี

- คุณสมบัติเมื่อแห้ง (Drying properties) ดินขาวที่บริสุทธิ์จะมีการหดตัวเมื่อแห้ง (Drying shrinkage) ไม่สูงนัก ดินขาวที่มีเม็ดละเอียด (Fine grained) จะมีค่าการหดตัวมากกว่าดินเม็ดหยาบ

- ความแข็งแรงของเนื้อดินก่อนเผา (Green strength) ดินขาวมีความแข็งแรงน้อยเพราะแตก ง่ายเมื่อแห้ง เพราะมีความเหนียวน้อย

- สมบัติหลังจากการเผา (Firing properties) ดินขาวที่มีคุณภาพดี เมื่อเผาแล้วควรจะได้สีขาว แต่ถ้าเป็นสีครีมหรือน้ำตาลอ่อน แสดงว่ามีแร่ธาตุเจือปนอยู่สูง ดินขาวที่มีการหดตัวเกิน 20 เปอร์เซ็นต์ หลังการเผาไม่ควรใช้ดินขาวนั้นในเนื้อดินปั้นปริมาณมาก เพราะชิ้นงานจะสามารถเกิดการ หดตัวมากจนเกิดการเสียรูป

2.5.1.2 ดินเหนียว (Plastic clay)

ดินเหนียวคือดินเนื้อละเอียดที่มีแร่ธาตุเจือปนอยู่ตามธรรมชาติค่อนข้างสูง ไม่บริสุทธิ์เหมือนดินขาว เมื่อขุดพบมีสีต่าง ๆ เช่น สีเหลือง สีเทา สีดำหรือสีส้มแดง หลังการเผาดินก็จะมีสีต่าง ๆ เช่น สีเทา สีน้ำตาล สีแดง สีดำ หรือสีเหลืองอมเทา ดังนั้นดินเหนียวก็คือดินที่มีความเหนียวเนื้อละเอียดที่เป็นสีต่าง ๆ ภายหลังจากเผาดินดำ (Ball clay) จัดว่าเป็นดินเหนียวประเภทหนึ่งด้วย แต่ดินดำแตกต่างจากดินเหนียวคือ ดินดำมีแร่ธาตุเจือปนอยู่ในปริมาณต่ำ ค่อนข้างบริสุทธิ์ แต่มีอินทรีย์สารเจือปนอยู่สูง ดินดำบางชนิดมีความเหนียวน้อย บางชนิดมีความเหนียวมาก

2.5.1.3 ดินดำ (Ball clay)

ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่ใช้ในการวิจัยนี้ คือ ดินเหนียวขาวที่เกิดจากดินขาว ซึ่งย้ายถิ่นไปตกตะกอนสะสมในแหล่งใหม่ (Sedimentary clay) ดินดำเป็นดินที่มี ขนาดผลึกเม็ดละเอียดมากอนุภาคของดินยึดเกาะกันได้ดี มีอินทรีย์สารที่มีโครงสร้างคล้ายกับที่พบในถ่านหินลิกไนต์เจือปนอยู่ แต่เมื่อนำไปเผาที่อุณหภูมิสูงเนื้อดินจะมีสีขาวหรือสีครีม อินทรีย์สารต่างๆ จะถูกเผาไหม้หมดไปจากเนื้อดินดำที่มีเนื้อละเอียดหลังการเผาเป็นสีขาว และมีความทนไฟ 1300 องศาเซลเซียส โดยไม่บิดเบี้ยวมากเป็นดินที่มีคุณภาพดี นิยมใช้ผสมในผลิตภัณฑ์สีขาว เช่น ปอร์ซเลน โบนไชนาและ ไวก์เอิร์ทเทินแวร์ ส่วนดินดำทั่วไปที่คุณภาพปานกลางมีทรายเจือปนอยู่มากใช้ทำเนื้อดินขึ้นรูป ด้วยแป้นหมุน ทำท่อน้ำดินเผาหรือผสมในเนื้อดินทำกระเบื้องปูพื้น

ส่วนประกอบทางเคมีของดินดำประกอบด้วยแร่เคโอลิไนต์เป็นส่วนใหญ่ เช่นเดียวกับดินขาว แต่เป็นผลึกเคโอลิไนต์ ชนิดไม่สมบูรณ์ (Disordered kaolinite) ในระหว่างผลึกมีแร่ธาตุและอินทรีย์สารแทรกอยู่ โดยประมาณ จะมีซิลิกา 40-60 เปอร์เซ็นต์ อะลูมินา 30 เปอร์เซ็นต์ น้ำผลึกและอินทรีย์สาร ประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ยังมีแร่ธาตุอื่นๆ ปะปนอยู่ในดินด้วย เช่น ไทเทเนียม (TiO_2) เฟอร์ริก (Fe_2O_3) แคลเซียม (CaO) แมกนีเซียม (MgO) เหล็กซัลเฟต ($FeSO_4$) โพแทสเซียม (K_2O) และ โซเดียม (Na_2O) เป็นต้น

สมบัติทางกายภาพของดินดำ

- ขนาดของดินดำจะมีผลึกละเอียดมากน้อยเพียงใด เปลี่ยนแปลงไปตามแหล่งที่พบ เมื่อถูกพัดพาไปไกลจากแหล่งกำเนิดเดิมมาก ขนาดเม็ดอนุภาคจะละเอียดมากขึ้นตามลำดับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.05-1.0 ไมครอน

- ความเหนียว (Plasticity) ดินดำเป็นดินที่อมน้ำได้มาก ความเหนียวจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดของดิน ซึ่งประกอบด้วยหลักสำคัญคือ ปริมาณอินทรีย์สาร ขนาดของเม็ดดิน และ วัตถุดิบที่ให้ ความเหนียว เช่น ดินเบนโตไนท์ เป็นต้น

- การหดตัวเมื่อแห้ง (Drying shrinkage) ดินดำที่มีทรายปนอยู่สูงแทบไม่มีการหดตัวเลย แต่ดินดำที่มีอินทรีย์สารสูงจะมีการหดตัวมากประมาณ 13-17 เปอร์เซ็นต์

- การหดตัวหลังเผา (Firing shrinkage) มีการหดตัวสูงประมาณ 15 เปอร์เซ็นต์เนื่องจากดินดำมีขนาดอนุภาคที่เล็กมาก

- ความแข็งแรงของดินเมื่อแห้งก่อนเผา (Green strength) โดยเนื้อดินจะมีความแข็งแรง (Strength) ประมาณ 100-1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

- สีหลังเผา เป็นสีขาวนวล

- มีแร่ธาตุต่างและไมก้า ทำหน้าที่เป็นตัวหลอมละลายช่วยลดอุณหภูมิในการเผา

ตารางที่ 2.3 ข้อดีและข้อเสียของดินดำ[7]

ข้อดี	ข้อเสีย
1. เพิ่มความเหนียวของผลิตภัณฑ์ ทำให้เนื้อดินปั้นขึ้นรูปได้ดี 2. เพิ่มความแข็งแรงก่อนเผา ลดการสูญเสียจากการแตกหักก่อนเผา 3. ทำให้น้ำดินหล่อที่ใช้ในการเทแบบไหลตัวดี 4. เสริมปฏิกริยาระหว่างมวลสารในระหว่างการเผาทำให้ดินสุกตัวเร็ว	1. มีสิ่งเจือปนสูง เช่น คาร์บอน เหล็ก ทำให้ผลิตภัณฑ์หลังการเผามีตำหนิ 2. ถ้าผสมในปริมาณมากเกินไป ทำให้ ผลิตภัณฑ์ไม่ค่อยโปร่งแสง มีการหดตัวสูง 3. มีองค์ประกอบไม่แน่นอน ทำให้ควบคุมอัตราส่วนผสมได้ยาก

2.5.2 ตัวหลอมละลายในเนื้อดิน (Flux)

คือวัตถุดิบที่ทำหน้าที่เป็นตัวหลอมละลายลดอุณหภูมิในการเผา การใช้ตัวหลอมละลายผสมในเนื้อดิน เพื่อให้เนื้อดินสุกตัวในอุณหภูมิที่ต้องการ ตัวหลอมละลายจะทำหน้าที่ประสานผลึกของวัตถุดิบต่าง ๆ ให้หลอมละลายเป็นเนื้อเดียวกัน ในขณะที่เนื้อดินถูกเผาผ่านความร้อนวัตถุดิบที่เป็นตัวหลอมละลายที่ถูกบดละเอียดผสมอยู่ในเนื้อดินจะเริ่มเกิดการหลอมตัวก่อน แล้วจึงดึงเอาวัตถุดิบทนไฟที่อยู่รอบ ๆ ผลึกมาหลอมเข้าด้วยกัน ทำให้ช่องว่างที่อยู่ระหว่างผลึกเม็ดดินหายไป และเนื้อดินเกิดการหดตัวรวมกันหลอมจนเป็นเนื้อแน่นคล้ายแก้ว ในระหว่างที่เตาเผาเย็นตัวลง เนื้อดินก็จะค่อย ๆ เย็นตัวกลายเป็นของแข็ง

ความพรุนตัวของดินหรือคุณสมบัติของดินภายหลังการเผาขึ้นอยู่กับปริมาณของวัตถุดิบที่เป็นตัวหลอมละลาย ถ้าใช้วัตถุดิบตัวหลอมละลายในปริมาณมากเกินไปดินอาจยุบตัวภายหลังการเผา

ดังนั้นหลักสำคัญในการผสมเนื้อดินปั้นต้องพยายามให้เนื้อดินมีช่วงเผาสุกตัวยาว คือ สามารถเผาให้สุกตัวได้ในอุณหภูมิที่มีความแตกต่างกัน ประมาณ 30-50 องศาเซลเซียสเพื่อความปลอดภัยในการเผามากยิ่งขึ้น แม้ว่าจะเผาเกินอุณหภูมิไปบ้างเล็กน้อยผลิตภัณฑ์ก็ไม่เกิดความเสียหาย

ตัวหลอมละลายที่ใช้ผสมในอุตสาหกรรมมีหลายชนิด เช่น หินฟันม้า (Feldspar) เนฟเฟลีนไซยาไนท์ (Nepheline syenite) ทัลค์ (Talc) หินปูน (CaCO_3) โดโลไมท์ (Dolomite) เป็นต้น แต่จะกล่าวถึงตัวหลอมละลายที่จะถูกแทนที่ในการวิจัยนี้คือ หินฟันม้า หรือ เฟลด์สปาร์ (Feldspar)

2.5.2.1 เฟลด์สปาร์ (Feldspar)

ในเนื้อดินปั้นต้องการตัวลดจุดหลอมตัวเพื่อทำให้เกิดเนื้อแก้ว (Glassy phase) ขึ้นปริมาณหนึ่งในระหว่างการเผา ซึ่งจะทำให้เนื้อผลิตภัณฑ์แข็งแกร่ง และโปร่งใส ตัวลดจุดหลอมตัวที่นิยมใช้มากที่สุดได้แก่ เฟลด์สปาร์ เฟลด์สปาร์เป็นวัตถุดิบที่สำคัญในกลุ่มที่ให้ต่างหรือวัตถุดิบช่วยในการหลอมละลายต่างในแร่เฟลด์สปาร์อยู่ในรูปผลึกที่ไม่ละลายน้ำ จึงสะดวกในการนำมาใช้เป็นวัตถุดิบผสมในเนื้อดินและน้ำเคลือบได้โดยตรง ไม่ต้องนำมาหลอมเป็นฟริต (Frit) ก่อนใช้เฟลด์สปาร์ใช้ผสมในเนื้อดินและน้ำเคลือบอุณหภูมิสูง เพื่อลดจุดหลอมละลายในการเผา เป็นตัวเริ่มก่อให้เกิดการเกิดเนื้อแก้วในดินปริมาณที่ใช้ในเนื้อดินประมาณ 15 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณที่ใช้ในเคลือบประมาณ 40-60 เปอร์เซ็นต์

เฟลด์สปาร์เป็นสารประกอบอะลูมิเนียมซิลิเกตของแอลคาไลและแอลคาไลเอิร์ท โดยเฉพาะสารประกอบของ Na K Ca พบมากและใช้มากในอุตสาหกรรมเซรามิก สารประกอบบริสุทธิ์ของ Na K Ca หาได้ยาก ในเฟลด์สปาร์จะมีทั้ง Na K Ca ซึ่งจะมีอัตราส่วนแตกต่างกันเนื่องจากสารประกอบทั้งสามตัวนี้มีการละลายซึ่งกันและกันในขณะที่เป็นของแข็ง เฟลด์สปาร์ใช้ในอุตสาหกรรมเซรามิกเพื่อเป็นตัวเริ่มก่อให้เกิดปฏิกิริยาการเกิดเนื้อแก้วในเนื้อผลิตภัณฑ์ ดังนั้น เฟลด์สปาร์จึงเป็นตัวส่งเสริมให้มีการเกิดการเปลี่ยนแปลงไปเป็นแก้ว และช่วยส่งเสริมให้ ผลิตภัณฑ์มีสมบัติโปร่งแสงดีขึ้น เฟลด์สปาร์เป็นแหล่งให้แอลคาไลและอะลูมินาแก่เคลือบ ข้อดีที่ทำให้อุตสาหกรรมเซรามิกนำเฟลด์สปาร์มาใช้คือ เฟลด์สปาร์เป็นแอลคาไลที่ไม่ละลายน้ำ

เฟลด์สปาร์ที่พบมากมี 3 ชนิด คือ ออร์โทเคลส แอลไบต์ และ อนอร์ไทต์ โครงสร้างเป็นร่างแห 3 มิติ เกิดจากการเชื่อมโยงกันของออกซิเจน ทั้ง 4 อะตอมของ oxygen-silicon tetrahedron นอกจากนี้ Al^{+3} ยังเข้าไปแทนที่ Si^{+4} บางส่วน และช่องว่างในโครงสร้างร่างแหยังถูก K^+ Na^+ Ca^{+2} เข้าไปอยู่ ขนาดของอนุภาค Na^+ เท่ากับ 0.98° Ca^{+2} เท่ากับ 1.06° K^+ เท่ากับ 1.33° เนื่องจาก Na^+ และ Ca^{+2} มีขนาดใกล้เคียงกัน สารประกอบทั้งสองจึงมีการละลายกันดี ส่วน K^+ มีขนาดใหญ่มาก จึงละลายกับสารประกอบ Na^+ และ Ca^{+2} ได้เพียงบางส่วน เฟลด์สปาร์ที่มี Na^+ และ Ca^{+2} เป็นส่วนประกอบที่มีโครงสร้างเป็นไตรคลินิก (triclinic) และเฟลด์สปาร์ที่มี K^+ เป็นส่วนประกอบมีโครงสร้างเป็นโมโนคลินิก (monoclinic) โครงสร้างของเฟลด์สปาร์เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น ในประเทศไทยมีเฟลด์สปาร์หลายแหล่ง เช่น ที่จังหวัดตาก อุทัยธานี ราชบุรี นครศรีธรรมราช เชียงใหม่ ลำพูน สุโขทัย และ กาญจนบุรี

ตารางที่ 2.4 สมบัติทางกายภาพของเฟลด์สปาร์[7]

ความถ่วงจำเพาะ	2.56-2.63
อุณหภูมิที่หลอมเหลว	1150-1530 องศาเซลเซียส
ความแข็ง	6.0-6.5 โมห์สเกล

ส่วนประกอบทางเคมีของเฟลด์สปาร์[8] เฟลด์สปาร์บางแห่งมี SiO_2 70 เปอร์เซ็นต์ Al_2O_3 18 เปอร์เซ็นต์ Fe_2O_3 0.1 เปอร์เซ็นต์ CaO 1.1 เปอร์เซ็นต์ K_2O 6.0 เปอร์เซ็นต์ และ Na_2O 5.0 เปอร์เซ็นต์ น้ำหนักหายไปหลังเผา 0.3 เปอร์เซ็นต์ บางแหล่งพบว่ามีเฟลด์สปาร์หลายชนิดผสมกันอยู่ เช่น โปแทสเฟลด์สปาร์ 47.9 เปอร์เซ็นต์ โซดาเฟลด์สปาร์ 30.6 เปอร์เซ็นต์ โลัมเฟลด์สปาร์ 4 เปอร์เซ็นต์ ควอตซ์ 14.1 เปอร์เซ็นต์ และอื่นๆ 3.4 เปอร์เซ็นต์ ในประเทศไทยมีการผลิตเฟลด์สปาร์ทั้งชนิดโปแทสและโซดาเฟลด์สปาร์ ซึ่งมีส่วนประกอบทางเคมีดังนี้

ตารางที่ 2.5 ส่วนประกอบทางเคมีของเฟลด์สปาร์[5]

องค์ประกอบ	โซดาเฟลด์สปาร์ (wt%)	โพแทสเฟลด์สปาร์ (wt%)
SiO ₂	67.2	67.7
Al ₂ O ₃	19.4	18.1
Fe ₂ O ₃	0.2	0.2
CaO	0.4	0.6
MgO	0.6	0.3
Na ₂ O	10.4	6.6
K ₂ O	0.4	4.9
Loss	0.8	0.8

2.5.3 ตัวทนไฟ (Refractory)

มีสมบัติช่วยเปิดเนื้อดินให้มีความพรุนตัว ช่วยลดการหดตัวของเนื้อดินขณะผึ่งแห้ง และลดความเหนียวของเนื้อดินลงด้วย นอกจากนี้ตัวทนไฟยังทำหน้าที่เป็นโครงสร้างของเนื้อผลิตภัณฑ์ ให้คงอยู่ในสภาพที่ไม่บิดเบี้ยวแตกร้าวหลังการเผา ทำให้เนื้อดินมีลักษณะพื้นผิวหยาบ หรือละเอียดตามความต้องการ และเพิ่มความแข็งแรงให้เนื้อดินหลังการเผา

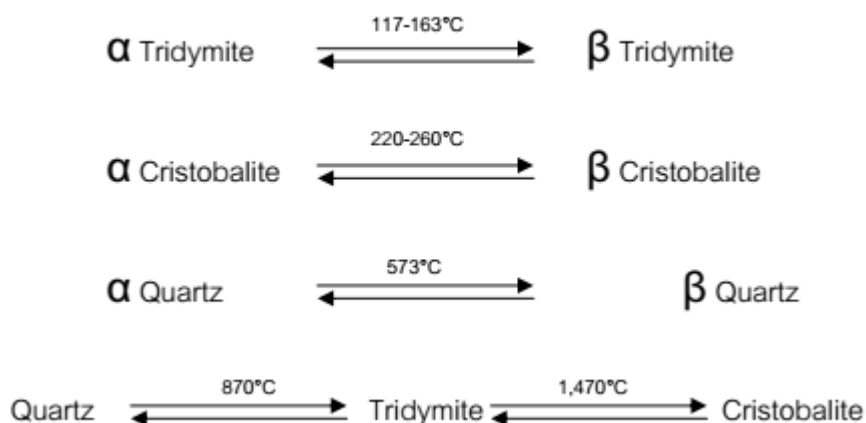
ตัวทนไฟที่ใช้ในการผลิตเซรามิก ได้แก่ ซิลิกา อะลูมินา วัตฤติบกลุ่มซิลิมาไนต์ (Silimanite group) คัลไซน์เคลย์ (Calcined clay) ไพโรฟิลไลต์ (Pyrophyllite) เซอร์คอน (Zircon) เป็นต้น ซึ่งในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะซิลิกา และอะลูมินาซึ่งใช้ในการวิจัยนี้

2.5.3.1 ซิลิกา (Silica, SiO₂) โดยปกติในดินทุกชนิดและในเฟลด์สปาร์จะมีซิลิกา เป็นองค์ประกอบในสูตรเคมี ในการเตรียมเนื้อดินจะมีการเพิ่มซิลิกาเข้าไปในสูตรดินด้วย อีกส่วนหนึ่งโดยใช้ซิลิกาบดละเอียด ซิลิกาที่เพิ่มเข้าไปต่างหากนี้ เรียกว่า ซิลิกาอิสระ การเพิ่มซิลิกาอิสระนี้บางครั้งเป็นอันตรายหลังการเผามากเพราะทำให้เนื้อดินขยายตัวมากกว่าสารเคลือบ (Thermal expansion) โดยปกติแล้วสารเคลือบจะไม่รานตัว ถ้าเนื้อดินและสารเคลือบหดตัวในอัตราส่วนใกล้เคียงกัน (ซิลิกาที่ประกอบอยู่ในเฟลด์สปาร์และเนื้อดินมีการขยายตัวและหดตัวน้อยกว่าซิลิกาอิสระที่เติมเข้าไป) ซิลิกาถูกนำมาใช้ประโยชน์ในการผลิต คือ ใช้เป็นส่วนผสมของเนื้อดินในการทำผลิตภัณฑ์เซรามิก ใช้เป็นส่วนผสมของสารเคลือบ ใช้ในอุตสาหกรรมแก้วและการก่อสร้าง ได้แก่ ทรา

ตารางที่ 2.6 สมบัติทางกายภาพของซิลิกา[7]

ความถ่วงจำเพาะ	2.65
ความแข็ง	7 โมห์สเกล
จุดหลอมละลาย	1728 °C
โครงสร้างผลึก	รูปหกเหลี่ยมเป็นร่างสามมิติ

ซิลิกาเมื่อถูกเผาผ่านความร้อนจะเปลี่ยนโครงสร้างของรูปผลึกอยู่หลายช่วงอุณหภูมิของการเผา โดยอะตอมของรูปผลึกถูกจัดเรียงตัวใหม่จากรูปแบบหนึ่งเปลี่ยนแปลงเป็น อีกแบบหนึ่ง แต่ละแบบจะสามารถคงสภาพอยู่ได้ในช่วงอุณหภูมิหนึ่ง การเปลี่ยนแปลงรูปผลึกนี้ เรียกว่า อินเวอร์ชัน (Inversion) การเปลี่ยนแปลงจะเกิดขึ้นเมื่อผลึกของซิลิกาถูกเผาผ่านความร้อน แต่เมื่อสิ้นสุดการเผา ซิลิกาจะเย็นตัวลง ผลึกต่างๆ จะย้อนกลับมาเป็นรูปเดิม เมื่อเย็นตัวลงถึงอุณหภูมิเดิมดังแสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งแสดงการเปลี่ยนแปลงเฟสของซิลิกาที่อุณหภูมิต่าง ๆ



รูปที่ 2.3 ปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงของผลึกซิลิกาเมื่อได้รับความร้อน[7]

2.5.3.2 อะลูมินา (Alumina, Al_2O_3) คือ อะลูมิเนียมออกไซด์ เรียกอีกชื่อหนึ่งว่าคอร์ันดัม (Corundum) ได้จากการเผาอะลูมินาไฮดรอกไซด์ ($Al(OH)_3$) ที่อุณหภูมิประมาณ 1000 องศาเซลเซียส เพื่อขจัดน้ำออกไป อะลูมินาเป็นประโยชน์มากในอุตสาหกรรมวัสดุทนไฟถึงแม้ว่า อะลูมินาจะแพงกว่าเฟลด์สปาร์ แต่ในอุตสาหกรรมแก้วที่ต้องการอัลคาไลน์น้อย ๆ จำเป็นต้องใช้อะลูมินา ข้อดีอีกประการหนึ่งของอะลูมินา คือ มีปริมาณเล็กน้อย สารประกอบมีความบริสุทธิ์ค่อนข้างสูง โดยทั่วไป

อะลูมินามักพบในรูปของไฮเดรต (Hydrate) คือผลึกของอะลูมินามีการรวมตัวทางเคมีกับน้ำ เช่น หินบอกไซต์ (Bauxite) ซึ่งประกอบด้วยแร่ที่สำคัญ 3 ชนิด ได้แก่ กิบบไซต์ (Gibbsite, $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) ไดอะพอร์ (Diapore, $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) โบห์ไมท์ (Boehmite, $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$)

ตารางที่ 2.7 สมบัติทางกายภาพของอะลูมินา[7]

ความถ่วงจำเพาะ	3.9-4.1
ความแข็ง	9 โมห์สเกล
จุดหลอมละลาย	2050 °C
Sintered alumina	1600-1900 °C
ความเป็นฉนวนไฟฟ้า	ดี

อะลูมินาเป็นวัสดุที่มีความทนไฟสูง มีความทนต่อการกัดกร่อนจากสารเคมี มีความแข็งแรง และมีคุณสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าได้ดี ด้วยคุณสมบัตินี้เอง อะลูมินาถูกนำมาใช้ในการผลิตวัตถุดิบไฟเบอร์กลอส หวีเทียน และแผ่นรองวงจรไฟฟ้า อย่างไรก็ตามการนำอะลูมินามาใช้ก็มีผลเสียในบางกรณี เช่น ทำให้อัตราการขยายตัวของดินต่ำไม่เท่ากับอัตราการขยายตัวของเคลือบเพราะผลึกอะลูมินาเมื่อเผาผ่านความร้อนไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปผลึกซับซ้อนเหมือนซิลิกา นอกจากนี้อะลูมินาเป็นวัสดุที่มีความถ่วงจำเพาะหนักถึง 3.95 ถ้าใช้ผสมเนื้อดินปริมาณ 35 เปอร์เซ็นต์ จะทำให้เนื้อดินหลังการเผาหนักเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 20 และอะลูมินามีค่าความแข็งสูงถึง 9 ซึ่งรองจากเพชร (ค่าความแข็งเท่ากับ 10) ทำให้การบดย่อยให้เป็นผงละเอียดทำได้ช้าและค่อนข้างยาก

อะลูมินาถูกนำมาใช้ประโยชน์ในการผลิต คือ ใช้ผสมเนื้อดินปนชนิดปอร์ซเลน เรียกว่าอะลูมินาปอร์ซเลน (Alumina porcelain) และผลิตภัณฑ์ฉนวนไฟฟ้าแรงสูง เพื่อเพิ่มความแข็งแรง ใช้ในอุตสาหกรรมที่จะต้องทนต่อการกัดกร่อนจากสารเคมี (Chemical-resistance purposes) และใช้ทำวัสดุทนไฟในเตาเผา (Refractory purposes) ใช้ในอุตสาหกรรมอิฐทนไฟ (High alumina bricks) ใช้ในการเตรียมน้ำเคลือบ เป็นส่วนของน้ำเคลือบเกือบทุกชนิด และมีคุณสมบัติทำให้น้ำเคลือบด้านถ้าใช้ในปริมาณมาก

2.6 กระเบื้องเซรามิกสโตนแวร์

เซรามิกที่มีองค์ประกอบที่สลับซับซ้อนที่สุดคือ กระเบื้องเซรามิก ซึ่งเกิดจากการประสานผลึกตามธรรมชาติของเซรามิกด้วยแก้ว ทำให้ผลิตภัณฑ์มีคุณสมบัติเป็นเลิศในการใช้งาน เนื่องจากกระเบื้องเซรามิกมี สมบัติคล้ายคลึงกับผลิตภัณฑ์ที่ทำมาจากแก้ว สามารถขึ้นรูปต่าง ๆ ตามความต้องการในตลาด การควบคุมอุณหภูมิการเผาอย่างมีประสิทธิภาพทำให้ส่วนประกอบที่มีคุณลักษณะของแก้วมากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ตกผลึก โดยขนาดของผลึกอยู่ระหว่าง 0.1-1 ไมครอน ส่วนแก้วที่เหลืออยู่ในปริมาณน้อยจะเต็มรอบผลึกอย่างมีประสิทธิภาพทำให้เกิดโครงสร้างที่ไม่มีรูพรุน กระเบื้องเซรามิกจะมีคุณสมบัติทางกลศาสตร์และการต้านทานความร้อนสูงกว่าเซรามิกทั่วไป

2.6.1 ความหมายของกระเบื้องตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

กระเบื้อง หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการอัด หรืออัดรีด ดิน และส่วนผสมอื่น เช่น หิน ทราย สี เป็นต้น แล้วเผาที่อุณหภูมิไม่น้อยกว่า 1000 องศาเซลเซียส จนเนื้อกระเบื้องแข็งแกร่งมีอัตราดูดซึมน้ำค่อนข้างต่ำ สามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิโดยฉับพลัน มีลักษณะเป็นแผ่น แต่ละแผ่นมีพื้นที่ไม่น้อยกว่า 90 ตารางเซนติเมตร มีสีและรูปร่างใด ๆ ก็ได้ มีทั้งประเภทเคลือบและไม่เคลือบ

2.6.2 ชนิดกระเบื้อง

กระเบื้องเซรามิกแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ กระเบื้องปูพื้น และกระเบื้องบุผนัง ทั้งสองชนิดมีลักษณะที่คล้ายกันมาก แต่มีรายละเอียดและคุณสมบัติบางประการที่ทำให้กระเบื้องทั้งสองชนิดนี้ต่างกัน มีทั้งชนิดไม่เคลือบและชนิดเคลือบ (เคลือบมันและเคลือบด้าน)

- กระเบื้องปูพื้น จะมีเนื้อที่แข็งแกร่งกว่ากระเบื้องบุผนัง เพื่อให้สามารถรับน้ำหนักที่กดลงบนตัวกระเบื้อง ต้องไม่มีการดูดซึมน้ำ และทนการขีดข่วน ส่วนใหญ่ผิวหน้าจะไม่มันเพื่อกันลื่น บางชนิดมีลักษณะพื้นผิวต่าง ๆ ไป แต่เรื่องความละเอียดอ่อนและความสวยงามของลวดลายจะมีความนุ่มนวลน้อยกว่ากระเบื้องบุผนัง โดยทั่วไปจะมีการระบุชนิดของกระเบื้องไว้ที่ด้านหลังหรือที่กล่อง

- กระเบื้องบุผนัง มักจะมีผิวมัน ไม่จำเป็นต้องมีความทนทานเหมือนกระเบื้องปูพื้นจึงรับน้ำหนักและต้านทานการขีดข่วนน้อยกว่า รวมทั้งมีการดูดซึมน้ำที่มากกว่าเนื่องจากกระเบื้องบุผนังจะเน้นไปที่เรื่องของการตกแต่ง จึงมีสีสันทันและลวดลายที่นุ่มนวลละเอียดอ่อน สวยงาม ทำให้ราคากระเบื้องบุผนังสูงกว่ากระเบื้องปูพื้น

2.6.3 กระบวนการผลิตกระเบื้องเซรามิก

โดยทั่วไปมีขั้นตอนดังนี้

1. การเตรียมเนื้อดิน ทำการผสมส่วนผสมเนื้อดินตามสูตรโดยการร่อนผ่านตะแกรงให้ส่วนผสมเข้ากันแล้วเติมน้ำให้มีความเหนียว

2. นำไปทำการขึ้นรูป ซึ่งสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การหล่อแบบ การอัดและรีดเนื้อดินปั้นผ่านหัวแบบ การอัดขึ้นรูปเนื้อดินปั้นที่เป็นฝุ่น ใช้ในงานวิจัยนี้ ดังจะได้กล่าวอย่างละเอียดในหัวข้อย่อยถัดไป

3. นำผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปเสร็จแล้วเข้าสู่อบไล่ความชื้น ซึ่งทำให้ผลิตภัณฑ์แห้งสม่ำเสมอไม่บิดเบี้ยวและแห้งในเวลาสั้น

4. ทำการตกแต่งชิ้นงานก่อนเผา โดยทำการตัดแต่งส่วนที่เกินออก

5. การเผา ซึ่งจะต้องใช้อุณหภูมิ ระยะเวลา และวิธีการแตกต่างกันไปตามแต่ชนิดของเนื้อดิน วัตถุประสงค์ในการเผา และรูปทรงของผลิตภัณฑ์

2.6.3.1 การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เซรามิกโดยใช้แรงอัด

การขึ้นรูปโดยวิธีนี้ใช้แพร่หลายในการผลิตผลิตภัณฑ์วัสดุทนไฟ กระเบื้องและผลิตภัณฑ์เซรามิกชนิดพิเศษ แรงอัดจะอัดบนแบบที่มีผงเนื้อดินปั้นแห้ง หรือมีความชื้นเล็กน้อยอยู่ภายในแบบแบบที่ใช้เป็นโลหะแข็ง วิธีการอัดผงเนื้อผลิตภัณฑ์อาจอัดด้วยเครื่องอัดชนิดต่าง ๆ ซึ่งมีแรงอัดต่างกันไป ในการอัดแผ่นกระเบื้องหรือผลิตภัณฑ์ใด ๆ สิ่งสำคัญคือ จะต้องทำให้ผลิตภัณฑ์มีความหนาแน่นสม่ำเสมอ ถ้าผลิตภัณฑ์มีความหนาแน่นไม่สม่ำเสมอจะเป็นเหตุทำให้ผลิตภัณฑ์โค้งงอและมีการหดตัวไม่เท่ากันเมื่อเผา การเคลื่อนตัวของฝุ่นได้ดีจะช่วยทำให้ การอัดได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความหนาแน่นสม่ำเสมอ การอัดผลิตภัณฑ์ขนาดเล็กความหนาแน่นจะสม่ำเสมอมากกว่าผลิตภัณฑ์ขนาดใหญ่ เนื่องจากมีแรงเสียดสีผนังแบบน้อยกว่า การอัดทั้งด้านบนและด้านล่างจะให้ความหนาแน่นสม่ำเสมอมากกว่าอัดเพียงด้านเดียว การใช้แรงอัดสูงมาก ๆ จะช่วยให้ผลิตภัณฑ์หลังเผามีความพรุนตัวและความหดตัวน้อย แต่แรงที่ใช้ต้องไม่มากเกินไปจนทำให้เกิดการแตก การแตกจะมีลักษณะเป็นแผ่นบริเวณกลางแผ่นในทิศทางตั้งฉากกับแนวของแรงที่กด สาเหตุที่ทำให้แตกคือ อากาศที่อยู่ในดินขยายตัวทำให้เกิดแรงซึ่งมากกว่าแรงยึดกันระหว่างเนื้อดิน อีกสาเหตุหนึ่งก็คือ ขณะยกแบบที่เป็นตัวอัดขึ้นเกิดแรงดูดระหว่างผิวแบบที่อัดและผิวหน้าผลิตภัณฑ์มากพอที่จะแยกผลิตภัณฑ์ออกเป็นสองส่วนการกระจายขนาดของอนุภาคในเนื้อดินปั้น มีความสำคัญต่อการอัดตัวกันของอนุภาคหลังจากขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ เพราะการหดตัวของผลิตภัณฑ์หลังจากเผาจนเนื้อดินแน่นจะต้องเท่ากับปริมาณของรูพรุนที่มีตั้งแต่เริ่มขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ การอัดตัวกันของอนุภาคที่มีรูปร่างต่างกันแต่มีขนาดเท่ากันจะมีความพรุนตัวแต่ละรูปร่างคือ รูปร่างลูกบาศก์เกิดความพรุนตัว 47.64 เปอร์เซ็นต์ รูปร่างพีระมิดหรือเต

ตะฮีดรอลเกิดที่ความพรุนตัว 25.95 เปอร์เซ็นต์ ความพรุนตัวจะลดลง เมื่ออนุภาคที่อัดตัวกันมีการกระจายขนาดของอนุภาคมากกว่าหนึ่งขนาด โดยปกติการผืนิกอนุภาคเข้าด้วยกันโดยอาศัยความร้อนและสมบัติเฉพาะตัวของผลิตภัณฑ์หลังจากเผาขึ้นกับขนาดของความพรุนตัวมากกว่าขึ้นกับขนาดของอนุภาค ส่วนผสมของเนื้อดินปั้นที่มีอนุภาคทั้งหยาบและละเอียด จะทำให้ได้เนื้อผลิตภัณฑ์ที่มีเนื้อแน่นมากและผลิตภัณฑ์มีการหดตัวน้อย

2.6.3.2 การอบผลิตภัณฑ์ให้แห้ง

การอบผลิตภัณฑ์ให้แห้ง เป็นขั้นตอนที่สำคัญขั้นตอนหนึ่ง คือจะต้องขจัดน้ำในผลิตภัณฑ์ได้เร็วและต้องไม่ทำให้เกิดความดันในผลิตภัณฑ์จนเป็นสาเหตุให้โค้งงอและแตก โดยที่กลไกการอบผลิตภัณฑ์ให้แห้ง ในผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปเสร็จใหม่ๆ จะมีน้ำประกอบอยู่ 4 รูปแบบด้วยกัน คือ

1. น้ำที่ถูกดูดซับอยู่ที่ผิวของอนุภาควัตถุดิบ (Absorbed water)
2. น้ำที่เป็นสาเหตุทำให้ผลิตภัณฑ์หดตัวเมื่ออบแห้ง (Shrinkage water)
3. น้ำซึ่งถูกขังอยู่ในช่องว่างในผลิตภัณฑ์ (Pore water)
4. น้ำซึ่งประกอบอยู่ในโครงสร้างของผลึกวัตถุดิบ (Crystal lattice water)

ผิวของแข็งทุกชนิดมีความสามารถในการดูดซับน้ำ ซึ่งอาจมีความหนาเพียงหนึ่งโมเลกุลหรือมากกว่า และการสะสมน้ำในเนื้อของแข็งจะเป็นไปอย่างต่อเนื่อง และอยู่ในรูปของหลอดเล็ก ๆ ปริมาณของน้ำที่ถูกดูดซับขึ้นอยู่กับความดันไอของน้ำในบรรยากาศ ดังนั้นเนื้อผลิตภัณฑ์เมื่อแห้งจะค่อยๆ ดูดซับน้ำในบรรยากาศจนถึงจุดสมดุล ดินขาวซึ่งมีเม็ดหยาบจะดูดซับได้น้อย พวกบอลส์เคลย์จะดูดซับความชื้นได้มากกว่าดินขาวเนื่องจากมีเม็ดละเอียดมากกว่าปริมาณของน้ำที่ทำให้ผลิตภัณฑ์หดตัวเมื่ออบผลิตภัณฑ์ให้แห้ง น้ำปริมาณนี้เป็นน้ำส่วนที่แยกอนุภาคของดินออกจากกันในขณะที่ดินนั้นยังคงสภาพความเหนียวอยู่ น้ำปริมาณนี้จะมีจำนวนโมเลกุลอยู่ในช่วง 200 โมเลกุล ดังนั้นเมื่อน้ำปริมาณนี้ถูกกำจัดออกไปในระหว่างการอบแห้ง จะเป็นสาเหตุทำให้ผลิตภัณฑ์มีการหดตัว น้ำที่ถูกขังอยู่ภายในช่องว่างของผลิตภัณฑ์นี้จะมีมากหรือน้อยขึ้นกับการกระจายตัวของขนาดของอนุภาคของวัตถุดิบ นอกจากนี้ยังขึ้นกับการอัดตัวกันของอนุภาควัตถุดิบ ขนาดของอนุภาคของวัตถุดิบถ้าใหญ่หรือหยาบโอกาสที่จะมีช่องว่างในผลิตภัณฑ์ก็มีมากและช่องว่างมีขนาดใหญ่ ฉะนั้นน้ำจึงมีโอกาสขังอยู่ในช่องว่างมากตามไปด้วย อนุภาคขนาดเล็กหรือละเอียดก็ให้ผลที่ตรงข้าม

2.6.3.2.1 การระเหยของน้ำที่ผิวผลิตภัณฑ์

อัตราการเร่งของการระเหยของน้ำที่ผิวผลิตภัณฑ์ มีค่าประมาณครึ่งหนึ่งของอัตราการเร่งของการระเหยของน้ำจากผิวน้ำด้วยกัน องค์ประกอบที่มีอิทธิพลต่อการระเหยของน้ำ ได้แก่ อุณหภูมิ ความดันไอน้ำในอากาศ และความเร็วลม

2.6.3.2.2 การเคลื่อนตัวของน้ำภายในเนื้อดิน

เมื่อน้ำที่ผิวของเนื้อดินระเหยไป น้ำในรูพรุนในเนื้อดินจะเคลื่อนตัวมาแทนที่ กระบวนการนี้เป็นไปอย่างต่อเนื่อง กลไกของปรากฏการณ์นี้อธิบายได้ 2 กรณีด้วยกัน กรณีแรกคือเมื่อรูพรุนในเนื้อดินมีน้ำอยู่เต็ม จะมีแรงสองแรงมากระทำแรงหนึ่งเป็นแรงไฮโดรสแตติกดันน้ำภายในรูพรุนให้ออกมาที่ผิวจนกว่าจะเกิดการสมดุล ส่วนอีกกรณีหนึ่งเกิดจากความต่างศักย์ของความชื้น ซึ่งจะขับน้ำบริเวณที่ชื้นมากกว่าภายในเนื้อดินออกมายังผิวซึ่งแห้งกว่า ในกรณีที่รูพรุนในเนื้อดินมีน้ำไม่มากนักคือเกือบแห้ง การเคลื่อนตัวของน้ำในรูพรุนเป็นแบบการระเหยซึ่งขึ้นกับแรงขับเคลื่อนเนื่องจากความต่างศักย์ของความชื้นในรูพรุนซึ่งต่อเนื่องกันแบบเป็นหลอดขนาดเล็ก

2.6.3.2.3 การโค้งงอของผลิตภัณฑ์ระหว่างทำการอบผลิตภัณฑ์

ปัญหาการโค้งงอของผลิตภัณฑ์เซรามิกเป็นปัญหาใหญ่ เกิดขึ้นได้ตลอดเวลาโดยไม่มีสาเหตุปรากฏให้เห็นอย่างชัดเจน มีสาเหตุมากมายที่ทำให้ผลิตภัณฑ์เซรามิกเกิดการโค้งงอระหว่างการอบแห้ง และสาเหตุเกี่ยวข้องกัน ยากที่จะแยกได้ สาเหตุอันหนึ่งที่ทำให้เกิดการโค้งงอ ได้แก่ ความไม่สม่ำเสมอของความชื้นในเนื้อผลิตภัณฑ์ ตัวอย่างเช่น การอัดแผ่นกระเบื้องลงบนแบบ เมื่อแผ่นกระเบื้องแห้ง ด้านที่ชื้นมากกว่าจะหดตัวมากกว่าด้านที่แห้ง ดังนั้นแผ่นกระเบื้องจะโค้งงอเป็นส่วนของวงกลม การแยกตัวออกมาของส่วนผสมบางตัวก็เป็นสาเหตุหนึ่งในการทำให้ผลิตภัณฑ์โค้งงอ แต่สาเหตุนี้ไม่ใช่สาเหตุที่จะเกิดขึ้นได้ง่าย เพราะเนื้อดินปั้นเป็นผงละเอียด การแยกตัวออกมาจากกันเกิดขึ้นได้ยาก อีกสาเหตุหนึ่งที่เกิดขึ้นได้ง่ายที่จะทำให้เกิดการโค้งงอ คือการเรียงตัวของอนุภาคของวัตถุดิบไม่สม่ำเสมอ สาเหตุนี้เกิดได้ทั้งในการขึ้นรูปโดยการอัดผ่านหัวแบบการหล่อแบบ ความหนาแน่นไม่สม่ำเสมอก็เป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดการโค้งงอและมักเกิดขึ้นเสมอในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์โดยการอัดผงเนื้อดินซึ่งมีเปอร์เซ็นต์ความชื้นระหว่าง 5-10 เปอร์เซ็นต์เหตุที่เกิดเนื่องจากเกิดความฝืดระหว่างผนังของแบบที่อัด หรือเกิดการกระจายของเนื้อดินที่ไม่สม่ำเสมอ การอัดทั้งด้านบนและด้านล่างจะช่วยให้เกิดความสม่ำเสมอมากขึ้น ซึ่งจะช่วยแก้ไขเรื่องความโค้งงอของผลิตภัณฑ์จากการอบแห้งได้

2.6.3.3 การเผาขึ้นรูปผลิตภัณฑ์

ปัจจุบันในอุตสาหกรรมเซรามิกต้องการวงจรการเผาที่รวดเร็ว แต่ต้องไม่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเล็ก ๆ และสมบัติส่วนใหญ่ของผลิตภัณฑ์ และจากการศึกษาพบว่า การเผาช้าจะทำให้ควอตซ์ละลายได้มากและขณะเดียวกันก็เกิดผลึกรูปเข็มของมุลไซต์ขึ้นมากเช่นกันส่วนการเผาที่เร็วเกินไปจะส่งผลในทางตรงกันข้าม นอกจากนี้นักเซรามิกบางคนให้เหตุผลว่า การเผาเร็วขึ้นจะได้เนื้อแก้วที่ไหลตัวดี ซึ่งจะมีผลช่วยทำให้ผลิตภัณฑ์มีความแข็งแรงดีขึ้น และขณะเดียวกันการเผาเร็วก็จะได้รูพรุนที่ซ่อนอยู่ในเนื้อผลิตภัณฑ์มากขึ้น อย่างไรก็ตามพบว่าการ ควบคุมผลิตภัณฑ์เผาที่จุดสุกตัวเพียง 1 ชั่วโมง ก็เป็นการเพียงพอที่จะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความแข็งแรงดี

2.6.3.4 อิทธิพลความร้อนที่มีต่อเนื้อดินปั้นผลิตภัณฑ์เซรามิก

2.6.3.4.1 โครงสร้างเนื้อดินปั้นก่อนเผา

ส่วนผสมของเนื้อดินปั้น เนื้อดินปั้นที่ประกอบด้วยดิน 50 เปอร์เซ็นต์ ควอตซ์ 25 เปอร์เซ็นต์ และเฟลด์สปาร์ชนิดโซดา 25 เปอร์เซ็นต์โดยประมาณ ในส่วนของเนื้อดินอาจจะประกอบด้วยดินหลายชนิด เป็นต้นว่า ดินขาว และบอลล์เคลย์ การเปลี่ยนแปลงส่วนผสมไปเล็กน้อยจะไม่มีผลกระทบต่อโครงสร้างเล็ก ๆ ในเนื้อผลิตภัณฑ์ ขนาดของวัตถุดิบที่ค้าขายกันในท้องตลาด ควอตซ์และเฟลด์สปาร์มีขนาดเฉลี่ย 40 ไมครอน ดินขาว 2 ไมครอน และบอลล์เคลย์ประมาณ 0.5 ไมครอน ขนาดดังกล่าวนี้ทำให้การอัดตัวกันของอนุภาคทั้งสามชนิดในเนื้อดินปั้นแน่นดีมาก รูปร่างของอนุภาคของดินส่วนใหญ่มีรูปร่างเป็นแผ่น ของเฟลด์สปาร์เป็นรูปปริซึมยาว ส่วนของควอตซ์มีรูปร่างไม่แน่นอน การอัดตัวกันของอนุภาค ในเนื้อดินปั้นที่ขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์และยังไม่ได้เผา การอัดตัวกันของขนาดอนุภาคทั้งสามชนิดนี้จะมีรูพรุนอยู่ประมาณ 35-40 เปอร์เซ็นต์ของปริมาตรทั้งหมด รูพรุนจะมีปริมาตรเปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อยเมื่อวิธีการขึ้นรูปต่างกันไป แม้ว่าเราจะควบคุมขนาดของอนุภาคของวัตถุดิบทั้งสามชนิดอย่างดี เราก็ไม่สามารถลดรูพรุนลงไปได้น้อยกว่า 28 เปอร์เซ็นต์ ผลิตภัณฑ์ที่ยังไม่ได้เผามีรูพรุนน้อย จะทำให้การหดตัวของผลิตภัณฑ์ที่เผาเสร็จแล้วน้อยตามไปด้วย

2.6.3.4.2 ปฏิบัติการที่เกิดขึ้นในเนื้อดินปั้นเมื่อถูกเผา

กระบวนการเผาอาจแยกได้หลายขั้นตอนตามอุณหภูมิต่าง ๆ แต่แต่ละขั้นตอนเกิดต่อเนื่องกันจนไม่สามารถแยกแต่ละขั้นให้เด่นชัดได้

1. การอบแห้งที่สมบูรณ์ ขั้นตอนนี้จะเป็นการขจัดความชื้นที่ถูกดูดซับอยู่บนผิวของอนุภาคซึ่งยังคงเหลืออยู่หลังจากการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ โดยผลิตภัณฑ์จะแห้งสนิทที่อุณหภูมิประมาณ 200 องศาเซลเซียส

2. การเผาไหม้พวกอินทรีย์สาร บอลล์เคลย์ทุกชนิดจะมีอินทรีย์สารเจือปนอยู่ในรูปของลิแกนด์เสมอ อินทรีย์สารเหล่านี้ จะเกิดการเผาไหม้รวมตัวกับออกซิเจนตั้งแต่อุณหภูมิ 200-700 องศาเซลเซียส การเผาไหม้จะเกิดได้ดีถ้าเราใช้อากาศขึ้น

3. การขจัดกลุ่ม OH- ออกจากดิน ขั้นนี้ประกอบด้วย การแยกสลายผลึกของดินออกเป็นโครงสร้างที่ไม่เป็นระเบียบ การเปลี่ยนแปลงนี้เป็นผลทำให้เกิดการหดตัวพร้อมกับเกิดรูพรุนในเนื้อผลิตภัณฑ์

4. การเปลี่ยนแปลงของควอตซ์ ควอตซ์ที่อุณหภูมิปกติจะเปลี่ยนไปเป็นควอตซ์ที่อุณหภูมิสูงประมาณ 573 องศาเซลเซียส คือ มีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งมีส่วนทำให้เกิดผลิตภัณฑ์เกิดการขยายตัว

5. การเกิดผลึกในเนื้อดิน ที่อุณหภูมิประมาณ 980 องศาเซลเซียส ในเนื้อดินจะมีการจัดเรียงตัวใหม่เกิด สไปเนล และในที่สุดเกิดมุลไลต์ขนาดเล็ก ๆ ขึ้น

6. การเกิดแก้ว โซเดียมเฟลสปาร์ทั้งชนิดโซดาและโพแทชเมื่อเผาถึงอุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส จะมีแก้วเกิดขึ้นแก้วนี้จะเกิดขึ้นบริเวณรอบอนุภาคของโซเดียมเฟลสปาร์ซึ่งสัมผัสกับเนื้อดิน นอกจากนี้แก้วอาจเกิดจากการหลอมตัวของไมกาซึ่งเจือปนมากับดินก็ได้ เมื่อเผาสูงขึ้นไปอีกเนื้อแก้วก็เพิ่มปริมาณมากขึ้น โซเดียมเฟลสปาร์จะไม่หลอมตัวเฉพาะผิวของมันเท่านั้น แต่จะหลอมบริเวณที่มีข้อบกพร่อง เช่น รอยแตกด้วย ดังนั้นโซเดียมเฟลสปาร์ที่เป็นของแข็งก็จะเล็กลง เมื่ออุณหภูมิสูงมากขึ้นโซเดียมเฟลสปาร์จะหลอมตัวหมด แต่จะยังคงรูปร่างของอนุภาคเดิมอยู่ ในขณะที่เดียวกันจะเกิดแก้วขึ้นในเนื้อดิน ถึงแม้ว่าอุณหภูมิตามทฤษฎีที่เกิดแก้วคือ 1550 องศาเซลเซียส ทั้งนี้เพราะว่า มีสิ่งสกปรกเจือปน และ นอกจากนี้ยังเกิดการแพร่ของพวกแอลคาไลอีกด้วย ตารางที่ 2.8 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างจุดสุกตัวหรืออุณหภูมิสูงสุดของการเผาผลิตภัณฑ์ที่เปอร์เซ็นต์การเกิด แก้ว มุลไลต์ และควอตซ์ในเนื้อผลิตภัณฑ์

7. การละลายของดินและควอตซ์ในเนื้อแก้ว การละลายของเนื้อดินบางส่วนและ บางส่วนของควอตซ์ในเนื้อแก้ว ถ้าควอตซ์มีขนาดเล็กอาจจะละลายได้หมดเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

8. การเกิดมุลไลต์ มุลไลต์มีผลึกรูปเข็มเกิดขึ้นในสองกรณี คือ เกิดจากดิน มุลไลต์ที่เกิดโดยการแยกผลึกออกมาจากดินนี้จะมีขนาดผลึกเล็กมาก และอีกทางหนึ่งคือ เกิดโดยการตกผลึกออกมาจาก

โซเดียมเฟลสปาร์หรือเนื้อแก้วส่วนอื่น มุลไลต์ละลายได้ดีในเนื้อแก้วที่มี SiO_2 สูง และจะเจริญเติบโตได้ดีในเนื้อแก้วที่มี SiO_2 ต่ำ การเกิดผลึกรูปเข็มของมุลไลต์ในเนื้อผลิตภัณฑ์มีส่วนช่วยทำให้ผลิตภัณฑ์มีความแข็งแรง ผลึกรูปเข็มนี้จะฝังตัวอยู่ในเนื้อแก้ว ประพฤติตัวเหมือนกับเหล็กเส้นในคอนกรีตเสริมเหล็ก

9. การเปลี่ยนแปลงของควอตซ์ไปเป็นคริสโตบาไลต์ ในเนื้อผลิตภัณฑ์เซรามิกที่มีสีขาวหลายอย่างแทบจะไม่พบคริสโตบาไลต์หรือพบน้อยมาก แต่ในผลิตภัณฑ์อื่นที่เผาสูงกว่าจะพบการเปลี่ยนแปลงของควอตซ์ไปเป็นคริสโตบาไลต์ ยิ่งในเนื้อแก้วที่ใสหรือมีความหนืดต่ำยิ่งเร่งให้มีการเปลี่ยนแปลงเร็วขึ้น

10. การหดตัวของผลิตภัณฑ์ ความพรุนตัวของผลิตภัณฑ์มีน้อยที่สุดที่อุณหภูมิระหว่าง 1100 - 1200 องศาเซลเซียส และจะมีค่ามากขึ้นเนื่องจากการขยายตัวของรูพรุน รูพรุนนี้เกิดจากก๊าซซึ่งอาจมาจากน้ำ คาร์บอนเนต และซัลเฟต หรือเกิดจากการเผาไหม้ของคาร์บอน รูพรุนที่กลวงนี้ซ่อนตัวอยู่ในเนื้อผลิตภัณฑ์ที่ไม่เชื่อมต่อถึงภายนอก ส่วนรูพรุนอีกชนิดหนึ่งจะเชื่อมต่อกับภายนอก รูพรุนชนิดนี้เกิดจากพวกฟองอากาศที่ถูกกักอยู่ในผลิตภัณฑ์ที่ปั้นเสร็จใหม่ ๆ และในระหว่างการเผาที่ไม่สามารถเชื่อมโยงรูพรุนเหล่านี้ให้ปิดสนิทได้ อย่างไรก็ตามก็สามารถลดรูพรุนเหล่านี้ได้หรือทำให้หมดไปด้วยการคุมสภาวะการเผาให้เหมาะสม แต่ไม่สามารถลดรูพรุนที่ซ่อนภายในเนื้อผลิตภัณฑ์ได้

ตารางที่ 2.8 แสดงส่วนประกอบในเนื้อผลิตภัณฑ์ที่สุกตัวที่อุณหภูมิต่าง ๆ [5]

อุณหภูมิ (°C)	เนื้อแก้ว (vol.%)	มุลไลต์ (vol.%)	ควอตซ์ (vol.%)
1200	56	19	25
1300	62	22	16
1400	68	22	10

2.6.3.5 อิทธิพลของพลังงานความร้อนที่มีต่อซิลิกา (SiO_2)

ซิลิกาในรูปของควอตซ์เราจะพบมากมายในธรรมชาติ แสดงให้เห็นรูปผลึกอย่างสมบูรณ์และมีความบริสุทธิ์สูง ผลึกหลายชนิดเมื่อได้รับพลังงานความร้อน มีสมบัติที่จะเกิดการเปลี่ยนแปลงจัดเรียงอะตอมจากรูปร่างหนึ่งไปเป็นอีกรูปร่างหนึ่ง รูปร่างแต่ละแบบจะสามารถคงสภาพอยู่ได้ในช่วงอุณหภูมิหนึ่ง การเปลี่ยนแปลงเช่นนี้ เรียกว่าเกิดอินเวอร์ชัน (Inversion) การเกิดอินเวอร์ชันนี้ มี 2 แบบ คือ แบบหนึ่งเกิดการเปลี่ยนแปลงแบบเรียงอะตอมใหม่อย่างมากมายหรืออาจเรียกว่าการเปลี่ยนแปลงอย่างรุนแรง ส่วนแบบสองเป็นแบบเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว เพียงมีการ

กระทบกระเทือนพันธะเพียงเล็กน้อยก็เกิดการเปลี่ยนแปลง การเปลี่ยนแปลงแบบสองนี้สามารถทำให้กลับคืนสภาพเดิมได้ง่าย (พร้อมที่จะคืนสภาพเหมือนเดิม) แต่การเปลี่ยนแปลงแบบแรกจะกลับคืนสู่สภาพเดิมได้ต้องมีการกระทำที่รุนแรง รูปร่างของควอตซ์ที่อุณหภูมิต่ำ มีโครงสร้างของอะตอมจับกันเป็นเกลียวซึ่งเกิดจากการจับกันทุกมุมของพีระมิดฐานสามเหลี่ยมยอดแหลมของซิลิคอนและออกซิเจน (Silicon-oxygen tetrahedron) เมื่อควอตซ์ถูกเผาถึงอุณหภูมิ 573 องศาเซลเซียส ควอตซ์จะเปลี่ยนรูปร่างต่อไปเป็นรูปร่างที่อุณหภูมิที่สูงมีขนาดใหญ่ขึ้น คือ เกิดการขยายตัวนั่นเอง

2.6.3.5.1 คริสโตบาไลต์ (Cristobalite)

เป็นรูปร่างหนึ่งของควอตซ์ผลิตได้โดยการทำให้ควอตซ์เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรุนแรง คริสโตบาไลต์มีโครงสร้างหลวมกว่าควอตซ์ จึงมีความหนาแน่นน้อยกว่าควอตซ์ คริสโตบาไลต์ผลิตได้โดยเผาควอตซ์กับสารประกอบที่เป็นตัวช่วยเร่งปฏิกิริยาเป็นของเหลวที่อุณหภูมิต่ำ สารนี้มักใช้ 2 เปอร์เซ็นต์ของ CaO คริสโตบาไลต์ที่อุณหภูมิต่ำจะเปลี่ยนรูปร่างไปเป็นคริสโตบาไลต์ที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 200 ถึง 280 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิสูงมีรูปร่างที่หลวมจึงมีความหนาแน่นน้อยกว่าคริสโตบาไลต์ที่อุณหภูมิต่ำ หรืออาจกล่าวได้ง่ายๆ ว่า คริสโตบาไลต์เมื่อถูกเผาถึงอุณหภูมิระหว่าง 200 ถึง 280 องศาเซลเซียส จะเกิดการขยายตัว

2.6.3.5.2 ทริดีไมท์ (Tridymite)

เป็นอีกรูปแบบหนึ่งของควอตซ์ ซึ่งสามารถผลิตได้จากควอตซ์ที่มีสิ่งสกปรกเจือปน และใช้สารประกอบที่ทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการกลายเป็นแก้วเข้าช่วยเร่งอีกด้วย ทริดีไมท์มีโครงสร้างหลวมกว่าควอตซ์มาก แร่นี้เปลี่ยนแปลงโครงสร้างที่อุณหภูมิสูงที่สองอุณหภูมิคือ 117 องศาเซลเซียส และ 163 องศาเซลเซียส ในบางกรณีจะพบการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นที่ 400 องศาเซลเซียส และ 500 องศาเซลเซียส

2.6.3.5.3 ฟลินต์ (Flint)

เป็นรูปร่างหนึ่งของควอตซ์ใช้มากในยุโรปประกอบด้วยผลึกเล็กๆ ของควอตซ์ และมีน้ำอยู่ในโครงสร้างประมาณ 1 เปอร์เซ็นต์ ถ้าเราเผาฟลินต์ระหว่างอุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ถึง 350 องศาเซลเซียส เราจะพบรอบแตกเล็กๆ ซึ่งเกิดเนื่องจากความดันของไอน้ำในโครงสร้างที่ถูกขจัดออกไป ในช่วงนี้น้ำจะถูกขจัดออกมาประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ และน้ำจะถูกขจัดออกมาอีก 30 เปอร์เซ็นต์ ในช่วง 350 องศาเซลเซียส ถึง 500 องศาเซลเซียส น้ำที่เหลือจะถูกขจัดออกไปที่อุณหภูมิ

1000 องศาเซลเซียส และที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียส ถึง 1200 องศาเซลเซียส ควอตซ์จะถูกเปลี่ยนไปเป็นคริสโตบาไลต์

2.6.3.6 อิทธิพลของพลังงานความร้อนที่มีต่อเฟลด์สปาร์

เฟลด์สปาร์จะสลายตัวให้ลิวโซิต (Leucite, $KAlSi_2O_6$) และแก้วที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส และลิวโซิตยังสามารถทนความร้อนได้ถึงอุณหภูมิ 1500 องศาเซลเซียส เมื่อเปรียบเทียบกับโซเดียมเฟลด์สปาร์และโพแทสเซียมเฟลด์สปาร์พบว่า โซเดียมเฟลด์สปาร์จะมีความหนืดต่ำหรือมีการไหลตัวที่ดีกว่า

2.6.3.7 การหดตัวและพฤติกรรมระหว่างการเผา

เมื่อแห้งทอดหรือผลิตภัณฑ์ดิบถูกเผาจะเกิดการหดตัวเรียกว่าการหดตัวหลังเผา เหมือนการหดตัวเมื่อแห้ง การหดตัวหลังเผามีค่าเปลี่ยนแปลงค่อนข้างกว้าง ขึ้นกับองค์ประกอบหลายประการ เช่น ชนิดของดินที่ประกอบอยู่ ความละเอียดของดิน ปริมาณอินทรีย์สารที่ปะปนอยู่ และวิธีการขึ้นรูปของแห้งทอดหรือผลิตภัณฑ์และอุณหภูมิที่เผา ปกติดินเหนียวหดตัวมากทั้งขณะแห้งและหลังจากเผา มากกว่าดินที่ปราศจากความเหนียว สารอินทรีย์ในดินทำให้ดินหลังเผามีการหดตัวมากขึ้น การหดตัวของดินจะหดตัวมากขึ้นเมื่อมีการเผาสูงขึ้น แต่ก็มีข้อจำกัดกล่าวคือ จะหดตัวน้อยลงหรือไม่หดตัวอีกเมื่อเผาลงถึงจุดหลอมหรือจุดสลายตัว เราไม่สามารถทำนายการหดตัวได้อย่างถูกต้องโดยไม่มีการทดสอบ ดินต่าง ๆ เมื่อการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างกว้างเมื่อถูกเผา ดินบางชนิดมีการหดตัวมากที่สุด ดินบางชนิดอาจสุกตัวที่อุณหภูมิสูง และมีการหดตัวน้อยกว่าดินบางชนิดที่มีจุดสุกตัวต่ำกว่า การหดตัวหลังเผาคัลายกับการหดตัวเมื่อแห้ง เป็นสมบัติที่สำคัญของดินเพราะว่าถ้ามีค่ามากเกินไปจะเป็นเหตุให้ผลิตภัณฑ์บิดเบี้ยว โค้งงอ และแตก เป็นเรื่องจำเป็นที่จะต้องรู้การหดตัวหลังเผา เพื่อจะได้มีความสามารถควบคุมขนาดของผลิตภัณฑ์สำเร็จ ไม่ว่าจะเป็ดินเพียงอย่างเดียว หรือจะเป็นส่วนผสมในเนื้อดินปนซึ่งมีดินผสมอยู่ด้วย

2.6.3.8 ตัวแปรเบื้องต้นที่มีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์เซรามิก

- ความบริสุทธิ์ของวัตถุดิบ ซึ่งมีความสำคัญต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์เป็นอย่างมาก เช่น ความแข็งแรง สีสัน และความเรียบของเนื้อผลิตภัณฑ์
- ส่วนผสมของเนื้อดิน ขึ้นอยู่กับสูตรที่ใช้ในการผลิตและชนิดของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ
- ขนาดของวัตถุดิบ มีผลต่อความละเอียดของเนื้อผลิตภัณฑ์ ความเรียบเนียน รวมไปถึงวิธีการในการผลิต
- อุณหภูมิในการเผา ซึ่งขึ้นอยู่กับเนื้อผลิตภัณฑ์ ความหนา บางของผลิตภัณฑ์

2.7 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

เพื่อให้ผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเซรามิกมีคุณภาพ เป็นที่เชื่อถือของผู้บริโภค สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม จึงได้กำหนดมาตรฐานทั่วไปของผลิตภัณฑ์เซรามิกไว้ ดังนี้

2.7.1 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาบุผนัง[9]

คุณลักษณะที่ต้องการ

1. ความต้านแรงดัด ไม่ระบุในมาตรฐาน
2. การดูดซึมน้ำ ไม่เกิน 18 เปอร์เซ็นต์
3. ความทนทานต่อการร้าว ต้องไม่ปรากฏการร้าว
4. ความทนทานต่อสารเคมี ต้องไม่ปรากฏรอยเสียหาย

2.7.2 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาปูพื้น[9]

คุณลักษณะที่ต้องการ

1. ความต้านแรงดัด
 - กระเบื้องประเภทดูดซึมน้ำต่ำและประเภทดูดซึมน้ำปานกลางค่อนข้างต่ำต้องมีความต้านแรงดัดไม่น้อยกว่า 25.0 เมกะพาสคัล
 - กระเบื้องประเภทดูดซึมน้ำปานกลางและประเภทดูดซึมน้ำสูงต้องมีความต้านแรงดัดไม่น้อยกว่า 17.5 เมกะพาสคัล
2. การดูดซึมน้ำ
 - กระเบื้องประเภทดูดซึมน้ำต่ำ (ทั้งชนิดเคลือบและไม่เคลือบ) การดูดซึมน้ำต้องไม่เกิน 3 เปอร์เซ็นต์
 - กระเบื้องประเภทดูดซึมน้ำปานกลางค่อนข้างต่ำ (ทั้งชนิดเคลือบและไม่เคลือบ) การดูดซึมน้ำต้องไม่เกิน 6 เปอร์เซ็นต์
 - กระเบื้องประเภทการดูดซึมน้ำปานกลาง (ต้องเป็นชนิดเคลือบอย่างเดียว) การดูดซึมน้ำต้องไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์
 - กระเบื้องประเภทดูดซึมน้ำสูง (ต้องเป็นชนิดเคลือบอย่างเดียว) การดูดซึมน้ำต้องไม่เกิน 16 เปอร์เซ็นต์

3. ความทนทานต่อการราน ต้องไม่ปรากฏการราน

4. ความทนทานต่อสารเคมี ต้องไม่ปรากฏรอยเสียหาย

2.8 การแอ่นตัว (Pyroplastic Deformation)

การแอ่นตัวของชิ้นงานกระเบื้องดินเผา เกิดจากชิ้นงานที่เผาในอุณหภูมิสูงนั้นเกิดเฟสของเหลว และมีการไหลตัวตามแรงโน้มถ่วงของโลก ทำให้ชิ้นงานเกิดการแอ่นตัว ซึ่งชิ้นงานจะเกิดการแอ่นตัว มากน้อยนั้น ขึ้นกับความหนืดของของเหลวที่เกิดขึ้นระหว่างการเผาชิ้นงาน โดยถ้าความหนืดของเฟส ของเหลวที่เกิดขึ้นนั้นมีความหนืดน้อยจะส่งผลให้เกิดการไหลตัวที่ดีของเฟสของเหลวและทำให้ ชิ้นงานนั้นเกิดการแอ่นตัวมากขึ้น[10]

การควบคุมไม่ให้เกิดการแอ่นตัวที่มากเกินไปของชิ้นงาน สามารถทำได้โดยการเพิ่มความหนืด ของเฟสของเหลว หรือการทำให้เฟสของเหลวนั้นสามารถเคลื่อนที่ได้ช้าลง โดยการให้เกิดผลึกขนาด เล็กขึ้นในชิ้นงาน ผลึกขนาดเล็กเหล่านี้จะช่วยขวางให้เคลื่อนที่ได้ช้าลง

นอกเหนือจากการแอ่นตัวที่เกิดจากการไหลตัวของเฟสของเหลวแล้ว ยังสามารถเกิดได้จาก น้ำหนักของชิ้นงานที่มีมากเกินไป หรือสามารถเกิดจากแทนวางชิ้นงานไม่ได้ระดับ

2.9 รวบรวมและทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

2.9.1 Preparation and characterization of red porcelain tiles with hematite tailings

โดย Y. Chen และคณะ[11] ศึกษาการเตรียมและลักษณะของกระเบื้องปอร์ซเลนที่มีแร่ ฮีมาไทต์ พบว่าการเพิ่มเฟสของฮีมาไทต์ช่วยให้กระเบื้องนั้นมีความแข็งแรงต่อการหักหลังเผา และ ความหนาแน่นโดยรวมหลังเผา สูงขึ้นตาม ปริมาณของเฟสของฮีมาไทต์ที่เพิ่มเข้าไปในส่วนผสม ส่งผลให้ การดูดซึมน้ำของกระเบื้องที่ทดลองนั้นลดน้อยลงตาม[12] ซึ่งเป็นสมบัติที่ช่วยในการต้านการเกิด pyroplastic deformation[13]

โดยการวิจัยนี้ได้ทำการเปรียบเทียบสมบัติต่าง ๆ ที่เปลี่ยนไปเมื่อเพิ่มปริมาณของแร่ฮีมาไทต์ เข้าไปในส่วนผสม ซึ่งจากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของแร่ฮีมาไทต์พบว่า มีองค์ประกอบทาง เคมีคล้ายคลึงกับเก้าหนักลิทไนต์ดังตารางที่ 2.9 โดยจะมีองค์ประกอบทางเคมีของ Al_2O_3 SiO_2 และ CaO อยู่ซึ่งเป็นตัวที่ช่วยทำให้เกิดผลึกของฮีมาไทต์ขึ้นในเนื้อชิ้นงาน แต่ในขณะเดียวกัน ก็มี Fe_2O_3 อยู่ในปริมาณสูง ซึ่งจะส่งผลทำให้ชิ้นงานนั้นสามารถมีการหลอมตัวที่ดีขึ้นด้วย

ตารางที่ 2.9 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุตั้งต้นที่ใช้เป็นส่วนผสม (wt%)

Composition	Hematite tailings	Kaolin	ควอตซ์ sand
SiO ₂	24.40	44.45	98.00
Al ₂ O ₃	10.95	37.73	-
CaO	6.20	0.02	-
Fe ₂ O ₃	44.52	0.24	-
MgO	0.99	0.06	-
P ₂ O ₅	2.78	-	-
K ₂ O	0.86	0.11	-
TiO ₂	0.42	0.19	-
Na ₂ O	0.28	0.11	-
LOI	6.95	17.09	2.00

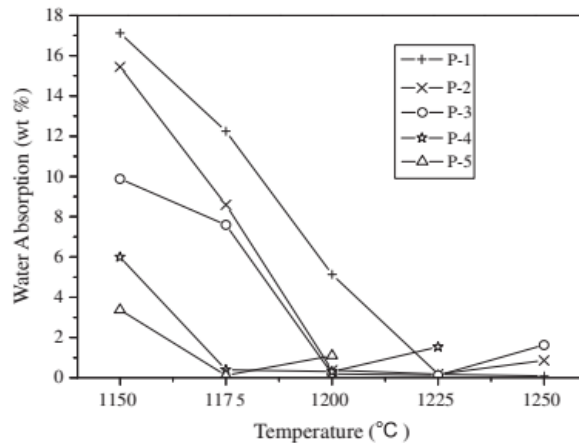
โดยการทดลองนี้ได้ทำการเพิ่มปริมาณของแร่ฮีมาไทต์ ขึ้นในอัตราส่วน 5% และลดปริมาณของควอตซ์ลง 5% และให้อัตราส่วนของดินขาวนั้นคงที่ในอัตราส่วน 25% ของทุกสูตร ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.10 สูตรส่วนผสมของ P-1 ถึง P-5

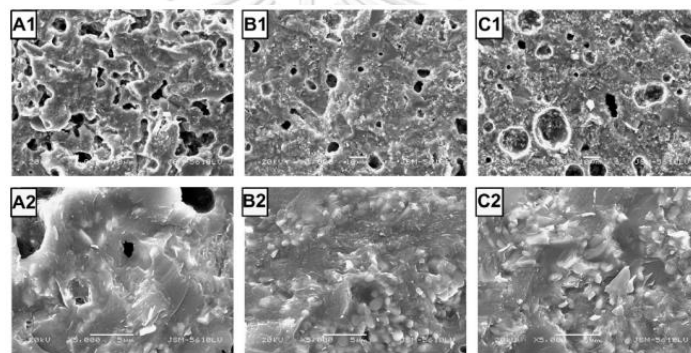
Sample codes	Hematite tailings	Kaolin	Quartz sand
P-1	50	25	25
P-2	55	25	20
P-3	60	25	15
P-4	65	25	10
P-5	70	25	5

CHULALONGKORN UNIVERSITY

และเมื่อทำการขึ้นรูปและทำการทดสอบสมบัติต่าง ๆ พบว่าความสามารถในการดูดซึมน้ำของชิ้นงานนั้นลดลงตามอัตราส่วนของแร่ฮีมาไทต์ที่เพิ่มขึ้น จากรูปที่ 2.4 และจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM พบว่ามีการเกิดขึ้นของผลึกอนอร์ไทต์ในชิ้นงานที่มีการเติมแร่ฮีมาไทต์ และเกิดผลึกอนอร์ไทต์ขึ้นในชิ้นงาน[14] โดยการที่ชิ้นงานถูกเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้นช่วยการดูดซึมน้ำนั้นน้อยลงเนื่องจากแร่เหล็กนั้นมีการหลอมตัวมากขึ้น และการเพิ่มอุณหภูมิเผาสูงขึ้นกว่า 1150°C จะส่งผลให้ปริมาณของอนอร์ไทต์ในชิ้นงานลดลงและเกิดการเปลี่ยนรูปเป็นผลึกอื่นแทน ทำให้ในการทดลองของเราจะใช้อุณหภูมิในการเผาที่ 1150°C



รูปที่ 2.4 อัตราการดูดซึมน้ำของชิ้นงานที่อุณหภูมิ 1150 ถึง 1250°C [11]



รูปที่ 2.5 การวิเคราะห์ SEM ของชิ้นงาน P-1(A1, A2), P-3(B1, B2), P-5(C1, C2) [11]

2.9.2 An insight into the pyroplasticity of porcelain stoneware tiles

โดย F.G. Melchiades และคณะ [15] ศึกษาพฤติกรรมการเกิด Pyroplastic Deformation ในกระเบื้องปอร์ซเลนสโตนแวร์ พบว่าการเกิด pyroplasticity นั้นขึ้นกับความหนืดของเฟสของเหลวที่เกิดขึ้นระหว่างการเผาชิ้นงาน มากกว่าอัตราส่วนของเฟส ซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อการดูดซึมน้ำ และความหนาแน่นโดยรวม โดยสมบัติของความหนืดในการดำเนินการเกิด pyroplasticity นั้นจะเพิ่มขึ้นขึ้นกับขนาดของอนุภาคของควอตซ์ ยิ่งขนาดอนุภาคเล็กเท่าไรจะทำให้อนุภาคนั้นสามารถที่จะสามารถละลายเข้าไปในเฟสของเหลวและเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเฟสของเหลวและเพิ่มความหนืดได้ และส่งผลให้เกิด pyroplastic deformation น้อยลงตาม

โดยการทดลองนี้มุ่งเน้นไปที่ ขนาดของผงควอตซ์ที่ใช้ในการทดลองโดยเทียบจากสูตรผสมที่มีผงขนาดหยาบ และผงขนาดละเอียด โดยชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยผงที่มีขนาดละเอียดนั้นมีค่าการแอ่นตัวที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยใช้ผงขนาดหยาบ ดังตารางที่ 2.11 และ 2.12 จะพบว่าสูตรที่ 52 และ 53 เมื่อเทียบกันแล้ว 52 จะเป็นสูตรที่เติมควอตซ์ที่มีขนาดใหญ่กว่า เมื่อเทียบกับ 53 ซึ่งเติม

ควอตซ์ขนาดเล็ก ส่งผลให้สูตรที่ 53 นั้นจะมีค่า Pyroplastic Index ที่ต่ำกว่าเนื่องจาก ควอตซ์ขนาดเล็กเมื่อได้รับความร้อนจากการเผาสามารถที่ละลายเข้าไปในเนื้อเฟสของเหลวได้ดีกว่า ทำให้เมื่อเทียบกับ ปริมาณของควอตซ์ที่ละลายในของเฟสเหลวของสูตร 53 สูงกว่าในสูตร 52 ส่งผลให้เฟสของเหลวของ 53 นั้นมีความหนืดที่มากกว่า

ตารางที่ 2.11 ส่วนผสมเพื่อทดสอบความแตกต่างของการใช้ผงขนาดเล็กและขนาดใหญ่

Compositions	52	53
Kaolin	25	25
Ball clays	12	12
Bentonite	4	4
Talc	4	4
Zircon	3	3
Na Feldspar C	21	21
Na-K Feldspar C	21	21
ควอตซ์ C	10	
ควอตซ์ F		10
K Feldspar F		

ตารางที่ 2.12 ผลการทดลองค่าการแอนตัว ความหนืดของเฟสของเหลว อัตราการดูดซึมน้ำ

	Property	unit	52	53
T _{md}	Maximum densification temperature	°C	1195	1190
PI	Pyroplasticity index	cm ⁻¹ (10 ⁻⁵)	8.4	7.8
E _p	Uniaxial viscosity	MPa·s	224	238
WA	Water absorption	wt%	0.01	0.17

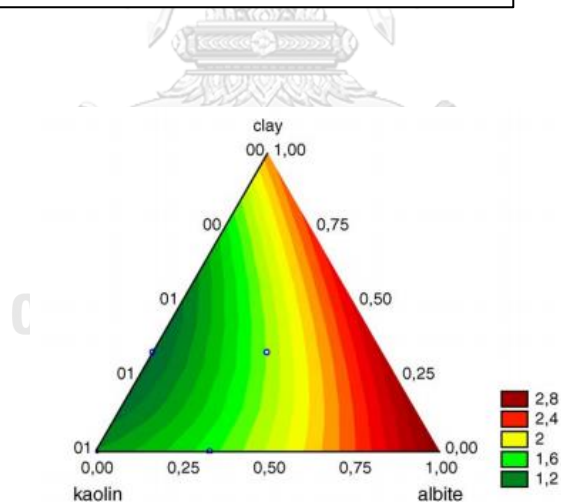
2.9.3 Pyroplasticity in porcelain tiles

โดย A.M. Bernardin และคณะ[10] ศึกษา Pyroplasticity ที่เกิดในกระเบื้องดินเผา พบว่าการเกิด pyroplastic deformation นั้นขึ้นกับแร่ที่นำมาใช้ในการผลิตกระเบื้อง โดยในการทดลองพบว่าการที่เพิ่ม โซเดียมออกไซด์ เข้าไปในส่วนผสม ทำให้เกิดการทำให้ปฏิกิริยาสร้างเป็นเฟสของเหลวที่มีความหนืดต่ำเกิดขึ้น[16] ส่งผลให้เกิดการเสียรูปแบบแอนตัว

การทดลองนี้ได้ทำการเติม โซเดียมออกไซด์ เข้าไปในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน ซึ่งสมบัติของ โซเดียมออกไซด์ นั้นจะเป็นตัวช่วยลดความหนืดของของเหลวเมื่อเผาชิ้นงานในอุณหภูมิสูงส่งผลให้ ชิ้นงานที่มีการเติมโซเดียมออกไซด์ เข้าไปในปริมาณมากนั้นจะมีการแ่นตัวมากกว่าชิ้นงานที่มี โซเดียมออกไซด์อยู่น้อย โดยโซเดียมออกไซด์ ที่ได้นั้นเกิดจากการเติม Albite เข้าไปในชิ้นงานตาม อัตราส่วนดังรูปที่ 2.13 และผลการทดลองของอัตราส่วนของ Albite ที่มีผลต่อการเกิด pyroplastic deformation ในรูปที่ 2.6 โดยโซเดียมออกไซด์จะทำหน้าที่เป็นตัวทำให้เฟสของเหลวนั้นสามารถ หลอมตัวได้ดีและเกิดความหนืดที่น้อยลง

ตารางที่ 2.13 แสดงอัตราส่วนผสมที่ใช้ในการทดลอง

Formulation (wt.%)	Kaolin	Phyllite	Talc	Albite	Clay
M01	50.0	20.0	10.0	10.0	10.0
M02	20.0	50.0	10.0	10.0	10.0
M03	20.0	20.0	40.0	10.0	10.0
M04	40.0	20.0	10.0	20.0	10.0
M05	20.0	40.0	10.0	20.0	10.0
M06	20.0	20.0	30.0	20.0	10.0
M07	40.0	20.0	10.0	10.0	20.0
M08	20.0	40.0	10.0	10.0	20.0
M09	20.0	20.0	30.0	10.0	20.0
M10	30.0	20.0	10.0	20.0	20.0
M11	20.0	30.0	10.0	20.0	20.0
M12	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0



รูปที่ 2.6 อัตราส่วนของ Albite ต่อการเกิด Pyroplasticity Index [10]

2.9.4 Effect of spodumene addition on pyroplastic deformation of porcelain stoneware

โดย T. Aydin และคณะ[17] ศึกษาผลกระทบของการเติม Spodumene ต่อ pyroplastic deformation ในปอร์ซเลนส์โตนแวร์ พบว่า การเติม Lithium aluminosilicates (spodumene) 4 wt% เข้าไปในเนื้อดินสูตรมาตรฐานในการผลิตกระเบื้องพบว่า spodumene นั้นช่วยในการกำจัดรูพรุนภายในชิ้นงาน ทำให้เนื้อของกระเบื้องที่ได้นั้นมีความหนาแน่นสูงขึ้น และยังทำให้สมบัติเชิงกลนั้นดีขึ้นอีกด้วย เนื่องด้วย spodumene ทำหน้าที่เป็นตัวลดความหนืดของของเหลวที่อุณหภูมิเผาขึ้นน้อยลง

ผลการทดลองที่ได้คือการ spodumene เข้าไปในชิ้นงานจะทำให้ความหนืดระหว่างเผาขึ้นลดลงส่งผลให้ความสามารถในการต้านทานการแอ่นตัวลดลงแต่ในทางกลับกันรูพรุนในชิ้นงานนั้นจะลดลงตามด้วยเนื่องจากขณะที่อุณหภูมิสูงเฟสแก้วสามารถไหลตัวได้ดี และจึงทำให้สามารถแทรกตัวเข้าไปอุดรูพรุนต่าง ๆ ในเนื้อของชิ้นงานได้ ส่งผลให้ชิ้นงานนั้นมีค่าความหนาแน่นสูง

2.9.5 Evaluation of pyroplastic deformation in sanitaryware porcelain bodies

โดย D. Yesim และคณะ[18] ศึกษาการเสียรูป pyroplastic ที่เกิดกับเครื่องสุขภัณฑ์ปอร์ซเลน พบว่า การเติม $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ และ $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ในอัตราส่วนต่าง ๆ กันลงไปเนื้อดินที่ใช้ในการผลิตสุขภัณฑ์ ทำให้เมื่อนำชิ้นงานไปเผา อัตราส่วนผสมที่ต่างกันทำให้ได้ความหนืดของเฟสของเหลวที่ต่างกัน ส่งผลให้สูตรที่มีค่าความหนืดสูงที่สุด มีการแอ่นตัวน้อยที่สุด โดยเมื่อเพิ่ม $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ สูงขึ้นจะส่งผลให้ความหนืดน้อยลง ส่งผลให้เกิด pyroplastic deformation มากขึ้น[19]

บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการขึ้นรูปกระเบื้องดินเผาที่มีส่วนผสมของเถ้าหนักลิกไนต์ ด้วยเทคนิคการอัดขึ้นรูปแบบแห้ง โดยศึกษาตัวแปรที่ใช้ในการขึ้นรูปกระเบื้องสูตรมาตรฐาน และ สูตรผสมเถ้าหนักลิกไนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 50 ได้แก่ แรงที่ใช้ในการอัดขึ้นรูป อัตราส่วนระหว่าง ดินดำ ดินขาว ทรายละเอียด และ เถ้าหนัก รวมไปถึง ความชื้นของวัตถุดิบที่ผสมแล้ว เพื่อให้ได้ แผ่นกระเบื้องที่จะเกิดการแอ่นตัวหลังการเผาที่น้อยที่สุด โดยทำการศึกษาผลของตัวแปรที่ใช้ในการขึ้นรูปได้แก่ องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุตั้งต้น อัตราส่วนที่ใช้ในการผสม อุณหภูมิการเผาผนึก ความสามารถในการดูดซึมน้ำ และการแอ่นตัว จากนั้นจึงนำสูตรที่ได้ใช้ในการหาอัตราส่วนของเถ้าหนักลิกไนต์ที่เหมาะสมแก่การนำไปใช้ในการผลิต กระเบื้องดินเผาที่มีสมบัติด้านการแอ่นตัว โดยศึกษาตัวแปรที่ใช้ในการขึ้นรูปกระเบื้อง ได้แก่ แรงที่ใช้ในการอัดขึ้นรูป อัตราส่วนระหว่าง ดินดำ ดินขาว ทรายละเอียด และ เถ้าหนัก รวมไปถึง ความชื้นของวัตถุดิบที่ผสมแล้ว พร้อมทั้งปรับอัตราส่วนผสมเพื่อให้กระเบื้องดินเผาที่มีสมบัติด้านการแอ่นตัวมากขึ้น จากนั้นนำไปทดสอบ สมบัติการดูดซึมน้ำ ความสามารถในการต้านทานตัว ความสามารถในการต้านการแอ่นตัว และศึกษาการกระจายตัวของโครงสร้างจุลภาคด้วยเครื่อง scanning electron microscope (SEM)

3.1 สารเคมีและวัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง

การผลิตกระเบื้องดินเผาที่มีเถ้าหนักลิกไนต์เป็นส่วนผสม แบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนได้แก่

3.1.1 การผลิตกระเบื้องดินเผาสูตรมาตรฐาน และ กระเบื้องดินเผาที่มีเถ้าหนักลิกไนต์เป็นส่วนผสมอัตราส่วนร้อยละ 50

3.1.2 การผลิตกระเบื้องดินเผาที่มีส่วนผสมระหว่าง กระเบื้องดินเผาสูตรมาตรฐาน และ กระเบื้องดินเผาที่มีเถ้าหนักลิกไนต์เป็นส่วนผสมอัตราส่วนร้อยละ 50 เพื่อได้กระเบื้องที่มีสมบัติด้านการโค้งงอที่ดีที่สุด

สารเคมีและวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองแสดงรายละเอียดในตารางที่ 3.1 ตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.1 รายละเอียดสารเคมีที่ใช้ในการขึ้นรูปกระเบื้องดินเผาจากถ่านหินลิกไนต์

สารเคมี	ชื่อทางการค้า	แหล่งที่มา
Ball Clay	Mae Tile	ลำปาง, ประเทศไทย
Kaolin	LPCV	ลำปาง, ประเทศไทย
Pottery Stone	-	Sibelco Minerals, ประเทศไทย
Lignite Bottom Ash	-	การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย
Na-Feldspar	-	Sibelco Minerals, ประเทศไทย
Milled Sand	CeraSil 325	Sibelco Minerals, ประเทศไทย

ตารางที่ 3.2 รายละเอียดเครื่องมือที่ใช้ในการขึ้นรูปกระเบื้องดินเผาจากถ่านหินลิกไนต์

เครื่องมือและอุปกรณ์	ผู้ผลิต	แบบ/รุ่น
-เครื่องชั่งน้ำหนัก	Sartorius	ED3202S
-Vibratory disk mill (tungsten carbide disk)	-	-
-ตู้อบอุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส	Binder	FD series
-เตาเผาอุณหภูมิ 1700 องศาเซลเซียส	Carbolite	HTF 1700
-เวอร์เนียคาลิปเปอร์ (ความละเอียด 0.01 mm)	Mitutoyo	-
-แม่พิมพ์ stainless steel (die)	-	5.00 x 7.50 x 1.50 cm ³
-เครื่องอัดไฮดรอลิก	-	-
-เทอร์โมมิเตอร์	-	Maximum service temp. 100°C
-เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF)	-	-
-เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (XRD)	-	-

3.2 การเตรียมตัวอย่าง

3.2.1 การตรวจสอบส่วนประกอบทางเคมีและโครงสร้างทางจุลภาคของเถ้าหนัก

3.2.1.1 การตรวจสอบส่วนประกอบทางเคมีโดยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray Fluorescence)

ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน ดังนี้

บดเถ้าหนักลิกไนต์ให้เป็นผงละเอียดกว่า 325 เมช โดยเตรียมสารตัวอย่างในปริมาณมากกว่า 1 กรัมขึ้นไป

นำผงของเถ้าหนักไปอัดด้วยเครื่องอัดขนาด 20-30 ตัน เวลา 10-20 วินาที ให้มีลักษณะแผ่นแล้ว นำเข้าเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ วิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ

3.2.1.2 การตรวจสอบโครงสร้างผลึกโดยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน (X-ray Diffractometer)

ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานและวิเคราะห์

บดเถ้าหนักลิกไนต์จนเป็นผงละเอียด นำเข้าเครื่องวิเคราะห์โดยใช้รังสีความยาวคลื่นเดียว (Monochromatic X-ray) จากเป้าโลหะทองแดงซึ่งให้ค่า ความยาวคลื่น Cu-K α 1.542 อังสตรอม โดยใช้มุมในการวิเคราะห์อยู่ในช่วง 10 ถึง 80 องศา ใช้เวลา 25 วินาทีต่อมุม

3.3 การขึ้นรูปกระเบื้องดินเผาสุทธามาตรฐาน และกระเบื้องผสมเถ้าหนักลิกไนต์อัตราส่วนร้อยละ 50

3.3.1 ขั้นตอนเตรียมวัตถุดิบตั้งต้น

วัตถุดิบหลักในการทดลองนี้ คือ ดินดำแม่ไต้ (Mae Tile Ball Clay) ดินขาวลำปาง (LPCV) และเถ้าหนักลิกไนต์ แรกเริ่มจะมาในรูปแบบของแข็งที่จับตัวเป็นก้อนและมีความชื้นจึงต้องทำการอบแห้งที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นจึงนำวัตถุดิบแต่ละชนิดแยกบดโดยเครื่องบดแบบจานสั่น (vibratory disk mill) ด้วยจานทั้งสแตนคาร์ไบด์ โดยทำการบดแบบแห้งเป็นเวลา 5 นาที จึงนำวัตถุดิบทั้งสามมาคัดขนาดด้วยการร่อนผ่านตะแกรง ขนาด 100 เมช เพื่อควบคุมขนาดเม็ด ผงตามความต้องการในการทดลอง

3.3.2 ขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบเพื่อผลิตกระเบื้องสุทธามาตรฐาน และสูตรผสมเถ้าหนักร้อยละ 50

ผงวัตถุดิบที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปที่ผ่านการบดละเอียดแล้วจะนำมาแบ่งเป็นอัตราส่วนตามสูตรต่าง ๆ และทำการเติมน้ำ 7 เปอร์เซ็นต์ ของน้ำหนักโดยรวมของแต่ละสูตรเพื่อให้มีความชื้นมากพอที่จะทำการอัดขึ้นรูปแบบแห้ง และทำการบดผสมด้วยเครื่องบดผสม (edge runner) โดยบดแห้งเป็นเวลานาน 30 นาที โดยปริมาณส่วนผสมที่ใช้เตรียมวัตถุดิบ ทั้งสี่สูตรดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 รายละเอียดสารเคมีที่ใช้ในการขึ้นรูปกระเบื้องดินเผาจากเถ้าหนักลิกไนต์

สูตร	วัตถุดิบ (wt%)					
	Mae Tile	LPCV	Pottery Stone	Lignite Bottom Ash	Na-Feldspar	Milled Sand
STD	30	30	30	-	5	5
T1	30	20	-	50	-	-
T2	30	10	-	50	10	-
T3	30	10	-	50	5	5

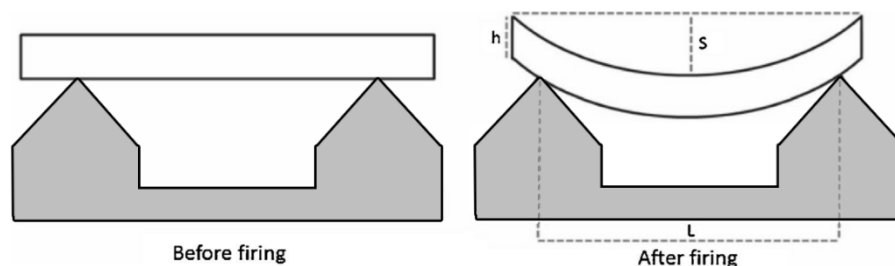
1. ชั่งน้ำหนักวัตถุดิบตั้งต้นตามอัตราส่วนดังตารางที่ 3.3 โดยน้ำหนักต่อการผลิต 1 สูตรเป็น 1 กิโลกรัม นำแต่ละสูตรมาบดผสมด้วยเครื่องบดผสม (edge runner) แบบแห้ง เป็นเวลา 30 นาที และเติมน้ำร้อยละ 7 ของน้ำหนักเพื่อให้มีความชื้นมากพอสำหรับอัดขึ้นรูปแบบแห้ง

2. นำแต่ละสูตรขนาดด้วยการร่อนผ่านตะแกรง ขนาด 100 เมช

ขั้นตอนการอัดขึ้นรูปแบบแห้ง

1. นำวัตถุดิบที่ผ่านการเตรียมแล้วแต่ละสูตร มาทำการอัดขึ้นรูปแบบแห้งด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก ใช้แม่พิมพ์ ขนาด 7 cm x 1 cm x 0.5 cm โดยทำการอัดด้วยแรงอัดที่ 20MPa

2. นำชิ้นงานที่ผ่านการอัดขึ้นรูปแบบแห้ง มาอบกำจัดความชื้นที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และ วางชิ้นงานบนฐานที่มีลักษณะดังรูปที่ 3.1 และทำการเผาอบผนังโดยใช้อัตราการให้ความร้อน เท่ากับ 100 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมง จนถึงอุณหภูมิอบผนัง 1150 องศาเซลเซียส เผาแห้งไว้เป็นเวลา 1 ชั่วโมง



รูปที่ 3.1 ชิ้นงานวางบนฐานเพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าสมบัติการต้านการแอ่นตัว[20]

3.3.3 การศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อกระเบื้องสุตรมาตรฐานและสุตรผสมเก้าหนักร้อยละ50

การดูดซึมน้ำ

การดูดซึมน้ำ (Water absorption) ของชิ้นงานหลังการเผาอบที่อุณหภูมิต่าง ๆ มีวิธีการตรวจสอบ ดังต่อไปนี้

1. อบชิ้นงานขนาด 7 cm x 1 cm x 0.5 cm ในตู้อบอุณหภูมิ 100 °C ให้แห้งเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทิ้งไว้ให้เย็น ชั่งน้ำหนักในอากาศ (W_1)
2. ต้มชิ้นงานในน้ำกลั่นจนเดือดเป็นเวลา 5 ชั่วโมง หลังจากนั้นแช่ทิ้งไว้ในน้ำเพื่อให้อิ่มตัวอีก 24 ชั่วโมง แล้ว ชั่งน้ำหนักอิ่มตัวของชิ้นงานในอากาศ (W_2)
3. แทนค่าในสมการที่ (3.1) เพื่อหาค่าการดูดซึมน้ำ

$$A_t = \frac{W_2 - W_1}{W_1} \times 100 \quad (3.1)$$

เมื่อ A_t คือ เปอร์เซนต์การดูดซึมน้ำของชิ้นงานหลังการเผาอบ (%)

W_1 คือ น้ำหนักของชิ้นงานแห้ง (g)

W_2 คือ น้ำหนักของชิ้นงานอิ่มตัว (g)

3.3.4 ขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบผลิตกระเบื้องที่ใช้สมบัติของเก้าหนักกลไกไนต์ในการต้านการแอ่นตัว

ผงวัตถุดิบที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปกระเบื้องสุตรมาตรฐาน นำมาผสมกับ สุตรที่มีเก้าหนักกลไกไนต์ผสมอยู่ร้อยละ 50 โดยแบ่งเป็นอัตราส่วนตามสูตรต่าง ๆ โดยสูตรที่จะนำมาใช้ในการทดลองจะต้องมีเก้าหนักผสมและมีค่าการดูดซึมน้ำใกล้เคียงกับกระเบื้องมาตรฐานมากที่สุด เพื่อนำมาใช้หาแนวโน้มที่เก้าส่งผลต่อการต้านการแอ่นตัวของกระเบื้อง โดยใช้วิธีการบดผสมด้วยเครื่องบดผสม (edge

runner) โดยบดแห้งเป็นเวลา 30 นาที และทำการอัดขึ้นรูปแบบแห้ง โดยปริมาณส่วนผสมที่ใช้เตรียมวัตถุดิบ ทั้งสี่สูตรดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 รายละเอียดสารเคมีที่ใช้ในการขึ้นรูปกระเบื้องดินเผาจากเถ้าหนักลิแกนด์

สูตร	วัตถุดิบ (wt%)	
	STD	T3
STD	100	-
T10	90	10
T20	80	20
T30	70	30
T40	60	40
T50	50	50
T60	40	60
T70	30	70
T80	20	80
T90	10	90
T3	-	100

1. ชั่งน้ำหนักวัตถุดิบตั้งต้นตามอัตราส่วนดังตารางที่ 3.4 โดยน้ำหนักต่อการผลิต 1 สูตรเป็น 1 กิโลกรัม นำแต่ละสูตรมาบดด้วยเครื่องบดผสม (edge runner) แบบแห้ง เป็นเวลา 30 นาที และเติมน้ำ 7% ของน้ำหนักเพื่อให้มีความชื้นมากพอสำหรับอัดขึ้นรูปแบบแห้ง

2. นำแต่ละสูตรคัดขนาดด้วยการร่อนผ่านตะแกรง ขนาด 100 เมช

ขั้นตอนการอัดขึ้นรูปแบบแห้ง

1. นำวัตถุดิบที่ผ่านการเตรียมแล้วแต่ละสูตร มาทำการอัดขึ้นรูปแบบแห้งด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก ใช้แม่พิมพ์ ขนาด 7 cm x 1 cm x 0.5 cm โดยทำการอัดด้วยแรงอัดที่ 20 MPa

2. นำชิ้นงานที่ผ่านการอัดขึ้นรูปแบบแห้ง มาอบกำจัดความชื้นที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และ วางชิ้นงานบนฐานที่มีลักษณะดังรูปที่ 3.1 และทำการเผาโดยใช้อัตราการให้ความร้อนเท่ากับ 100 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมง จนถึงอุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียส เผาแซ้ไว้เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

3.3.5 การศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อกระเบื้องที่ใช้สมบัติของเจ้าหน้าที่ในการดำเนินการแอนตัว

3.3.5.1 ความหนาแน่นก่อนการเผา (green density) [21]

การหาความหนาแน่นก่อนการเผา มีวิธีการดังต่อไปนี้

1. ชั่งน้ำหนักของชิ้นงานที่ผ่านการอบแห้งแล้ว (M)
2. หาปริมาตรของชิ้นงาน (V) โดยวัดขนาดความกว้าง ความยาว และความหนาของชิ้นงาน
3. หาความหนาแน่นก่อนการเผาจากความสัมพันธ์ของสมการที่ (3.2)

$$\rho = M/V \quad (3.2)$$

เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่นก่อนการเผา (g/cm^3)

M คือ น้ำหนักของชิ้นงานที่ผ่านการอบแห้ง (g)

V คือ ปริมาตรของชิ้นงาน (cm^3)

3.3.5.2 การสูญเสียน้ำหนักของชิ้นงาน

การสูญเสียน้ำหนักของชิ้นงานหลังเผา (Weight loss) [22] เกิดจากการที่ดินค้ำมีส่วนช่วยเพิ่มสมบัติการยึดเกาะแก่ชิ้นงานในขั้นตอนการอัดขึ้นรูปให้ได้ชิ้นงานที่มีความแข็งแรงก่อนการเผาอบผนึกสูง ซึ่งอาจมีความชื้นและสารอนินทรีย์หลงเหลืออยู่ในระหว่างขั้นตอนการเตรียมสาร ดังนั้นในขั้นตอนการเผาอบผนึกซึ่งใช้อุณหภูมิที่สูงมากจะมีผลให้เกิดสลายตัวของสารอนินทรีย์และทำให้ชิ้นงานเกิดการสูญเสียน้ำหนักได้ ซึ่งจะมีผลต่อส่วนผสมและสมบัติของชิ้นงาน จึงต้องพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักชิ้นงานทั้งก่อนและหลังการเผา โดยการคำนวณหาค่าน้ำหนักที่หายไป จากการชั่งน้ำหนักก่อนและหลังการเผาของชิ้นงาน แล้วนำค่าที่ได้มาแทนลงในสมการที่ (3.3)

$$W_t = \frac{W_p - W_f}{W_p} \times 100 \quad (3.3)$$

เมื่อ W_t คือเปอร์เซ็นต์สูญเสียน้ำหนักของชิ้นงาน (%)

W_p คือค่าน้ำหนักของชิ้นงานก่อนเผา (g)

W_f คือค่าน้ำหนักของชิ้นงานหลังเผา (g)

3.3.5.3 การหดตัวเชิงเส้น

การหดตัวเชิงเส้น (Linear shrinkage)[23] ของชิ้นงานหลังการเผาที่อุณหภูมิต่างๆ มีวิธีการตรวจสอบตามมาตรฐาน ASTM C 326 ดังต่อไปนี้

1. วัดขนาดความยาวของชิ้นงานก่อนการเผา
2. วัดขนาดความยาวของชิ้นงานหลังการเผา
3. แทนค่าในสมการที่ (3.4) เพื่อหาค่าการหดตัว

$$S_t = \frac{L_p - L_f}{L_p} \times 100 \quad (3.4)$$

เมื่อ S_t คือเปอร์เซ็นต์การหดตัวหลังการเผา (%)

L_p คือความยาวของชิ้นงานก่อนการเผา (mm)

L_f คือความยาวของชิ้นงานหลังการเผา (mm)

3.3.5.4 การดูดซึมน้ำ

การดูดซึมน้ำของชิ้นงานหลังการเผา (Water absorption)[22] [24] อบผนึกที่อุณหภูมิต่างๆ มีวิธีการตรวจสอบ ดังต่อไปนี้

1. อบชิ้นงานขนาด 7 cm x 1 cm x 0.5 cm ในตู้อบอุณหภูมิ 100 °C ให้แห้งเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทิ้งไว้ให้เย็น ชั่งน้ำหนักในอากาศ (W_1)

2. ต้มชิ้นงานในน้ำกลั่นจนเดือดเป็นเวลา 5 ชั่วโมง หลังจากนั้นแช่ทิ้งไว้ในน้ำเพื่อให้อิมมัตว์อีก 24 ชั่วโมง แล้ว ชั่งน้ำหนักอิมมัตว์ของชิ้นงานในอากาศ (W_2)

3. แทนค่าในสมการที่ (3.1) เพื่อหาค่าการดูดซึมน้ำ

$$A_t = \frac{W_2 - W_1}{W_1} \times 100 \quad (3.1)$$

เมื่อ A_t คือ เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของชิ้นงานหลังการเผา (%)

W_1 คือ น้ำหนักของชิ้นงานแห้ง (g)

W_2 คือ น้ำหนักของชิ้นงานอิมมัตว์ (g)

3.3.5.5 สมบัติการต้านการแอ่นตัว

สมบัติการต้านการแอ่นตัว (pyroplastic index : PI)[25] โดย นำชิ้นงานที่ผ่านการเผาผนึกบนฐานวางมาวัดขนาดดังรูปที่ 3.1 และแทนค่าในสมการที่ (3.5) เพื่อหาค่าการต้านการแอ่นตัว

$$PI = \frac{4h^2S}{3L^4} \quad (3.5)$$

เมื่อ h คือ ความหนาชิ้นงาน (mm)

S คือ ระยะที่เกิดการแอ่นตัว (mm)

L คือ ระยะห่างระหว่างปลายฐานที่สัมผัสชิ้นงาน (mm)

3.3.5.6 7 ความต้านแรงดัดโค้งหลังการเผา

ความต้านแรงดัดโค้ง (Modulus of rupture) [23, 24] คือ ค่าความเค้นที่ได้จากการทดสอบแรงกดชิ้นงานตัวอย่างให้เกิดการร้าวโดยใช้หัวกด ซึ่งกดลงตั้งฉากกับชิ้นงานตัวอย่างที่อยู่ในลักษณะแนวนอนโดยมีตัวรองรับ (supporting jig) เป็นตัวกำหนดช่วงห่าง (span) การทดสอบแบบนี้คล้ายกับการรวมเอาการทดสอบการดึงและการอัดเข้าไว้ด้วยกัน ซึ่งแรงอัดจะเกิดขึ้นบนชิ้นงานตัวอย่าง ส่วนแรงดึงจะเกิดขึ้นที่ผิวบริเวณใต้ชิ้นงานสามารถทดสอบ โดยการทดสอบแรงดัดโค้งแบบ 3 จุด (three point bending) ใช้อัตราในการกด 1.5 มิลลิเมตรต่อนาที

$$\sigma = \frac{3 \cdot P \cdot L}{2 \cdot W_i \cdot h^2} \quad (3.6)$$

เมื่อ	σ	คือ ความต้านแรงดัดโค้ง (N/mm ² หรือ MPa)
	P	คือ แรงกดสูงสุดเมื่อชิ้นงานแตกหัก (N)
	L	คือ ระยะห่างของตัวรองรับชิ้นงานตัวอย่าง (mm)
	W_i	คือ ความกว้างของชิ้นงานตัวอย่าง (mm)
	h	คือ ความหนาชิ้นงานตัวอย่าง (mm)

3.3.5.7 โครงสร้างจุลภาค

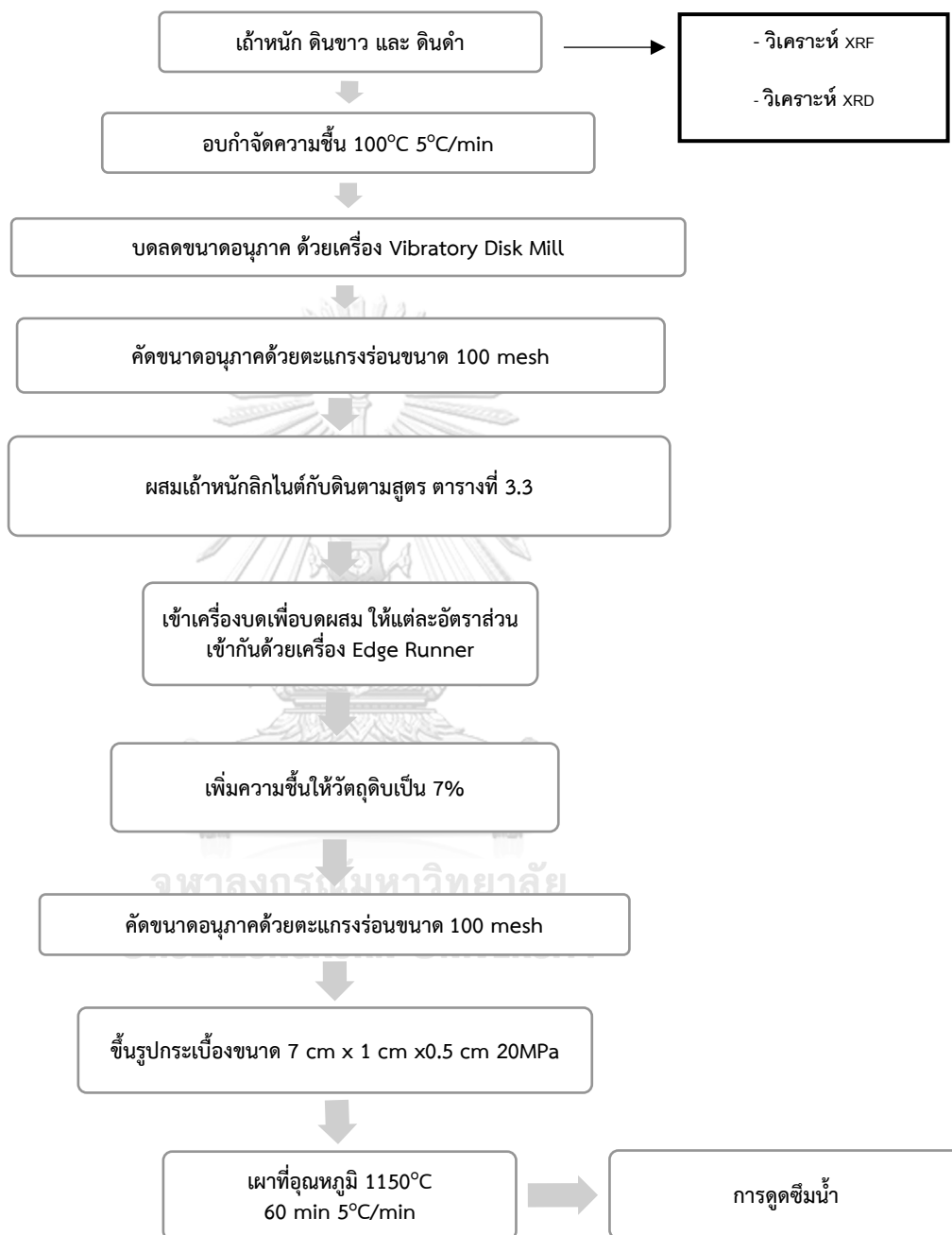
การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของแต่ละอัตราส่วน เพื่อดูลักษณะการกระจายตัวของเฟส และปริมาณการเกิดเฟสोनอร์ไทต์ด้วยเครื่อง Scanning electron microscope (JEOL, JSM-6480LV operating at 15 kV)

นำชิ้นงานแต่ละสูตร ชัดด้วยกระดาษทราย ขนาดความละเอียด 150 300 600 1200 และ 2400 3000 ตามลำดับ จากนั้นขัดด้วยผงขัดเพชร ขนาด 0.5 ไมครอน ทำความสะอาดด้วยเครื่อง Ultra Sonicator เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นทำการกัดด้วยกรด HF ที่มีการเจือจางด้วยน้ำกลั่นมีความเข้มข้นที่ 5% เป็นเวลา 30 วินาที จากนั้นทำความสะอาดด้วยเครื่อง Ultra Sonicator เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และทำการอบแห้งที่ 100 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำชิ้นงานไปเคลือบผิวด้วยทอง และวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยเครื่อง Scanning electron microscope ที่กำลังขยาย 500 10,000 20,000 เท่า และทำการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ



3.4 แผนผังงานวิจัย

3.4.1 แผนผังการเตรียมและทดสอบชิ้นงานกระเบื้องสูตรมาตรฐานและสูตรผสมเถ้าหนักร้อยละ 50



รูปที่ 3.2 แผนผังการเตรียมและทดสอบการดูดซึมน้ำของชิ้นงานกระเบื้อง

3.4.2 แผนผังการเตรียมและทดสอบชิ้นงานกระเบื้องที่ใช้สมบัติของเก้าหนักลิทไนต์ในการต้านการแอ่นตัว



รูปที่ 3.3 แผนผังการเตรียมและทดสอบชิ้นงานกระเบื้องที่ใช้สมบัติของเก้าหนักลิทไนต์ในการต้านการแอ่นตัว

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

4.1 ผลการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของถ่านหินลิกไนต์เทียบกับดินดำ

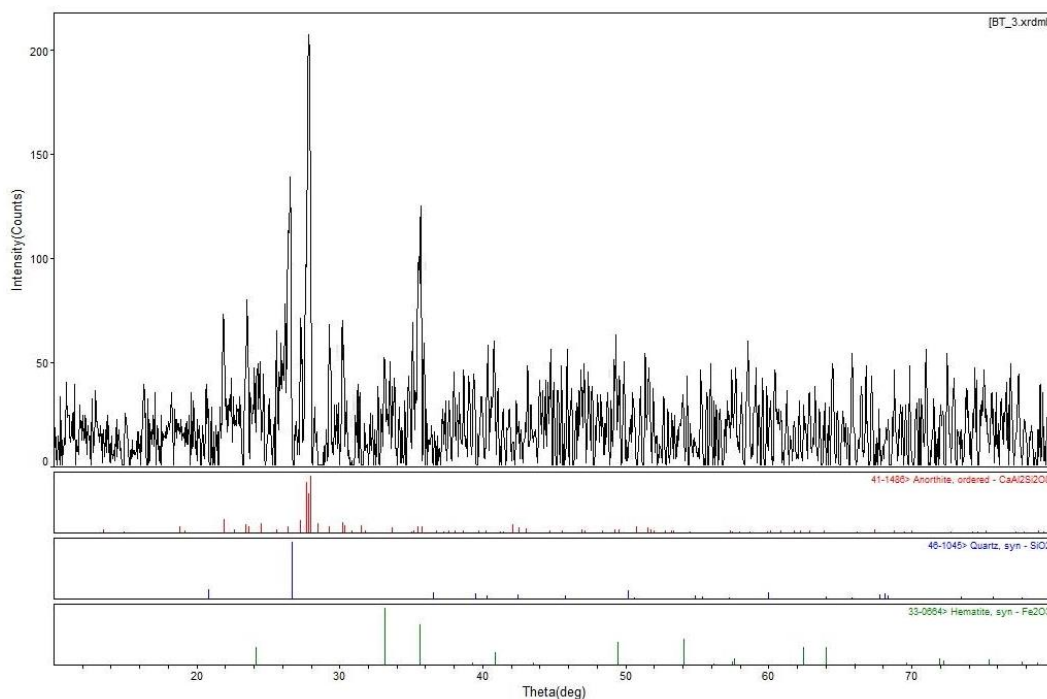
ผลการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของถ่านหินลิกไนต์แสดงดังตารางที่ 4.1 พบว่าถ่านหินลิกไนต์มีอัตราส่วนของ Al_2O_3 SiO_2 CaO และ Fe_2O_3 เป็นองค์ประกอบหลัก และมีในปริมาณมาก เมื่อเทียบกับองค์ประกอบทางเคมีของดินดำ (ตารางที่ 4.1) พบว่าถ่านหินลิกไนต์มี SiO_2 สูงเมื่อเทียบกับดินดำที่มี SiO_2 สูงเช่นกัน แต่ในทางกลับกัน ถ่านหินลิกไนต์นั้นพบ CaO และ Fe_2O_3 ที่สูง[26] ด้วยซึ่งส่งผลให้อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาผนึกลดลงด้วย[27] จึงมีความเป็นไปได้ที่จะสามารถนำถ่านหินลิกไนต์มาใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตกระเบื้องดินเผา

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของถ่านหินลิกไนต์ และ ดินดำแม่ไทล์

องค์ประกอบทางเคมี	Al_2O_3	SiO_2	CaO	Fe_2O_3	SO_3	K_2O	MgO	Na_2O	TiO_2	LOI
ถ่านหินลิกไนต์	17.7	32.9	21.0	18.2	3.21	3.11	1.59	0.79	0.63	0.86
ดินดำแม่ไทล์	29.40	54.20	0.20	1.10	-	1.90	0.50	0.20	0.50	11.9

4.2 ผลการศึกษาโครงสร้างผลึกของถ่านหินลิกไนต์

ผลการศึกษาองค์ประกอบของผลึกด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (XRD) ของถ่านหินลิกไนต์ ดังรูปที่ 4.1 พบว่า เฟสหลัก ๆ ของถ่านหิน ประกอบด้วยอนอร์ไทต์ ควอตซ์ Magnetite และ Hematite ซึ่งปัจจัยหลักที่เป็นตัวช่วยในการให้เกิดการแอนตัวที่น้อยลงนั้นขึ้นอยู่กับอนอร์ไทต์ ซึ่งจะเป็นตัวช่วยให้ความหนืดของของเหลวในช่วงระหว่างการเผาผนึกนั้นหนืดขึ้น[28] และทำให้ชิ้นงานเกิดการต้านการแอนตัว ดังนั้น การที่นำถ่านหินลิกไนต์มาใช้ในส่วนผสม จะส่งผลให้ชิ้นงานนั้นมีสมบัติการต้านการแอนตัวที่ดีขึ้น



รูปที่ 4.1 X-ray pattern ของเก้าหนักลิไกไนต์จากการวิเคราะห์โดยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์

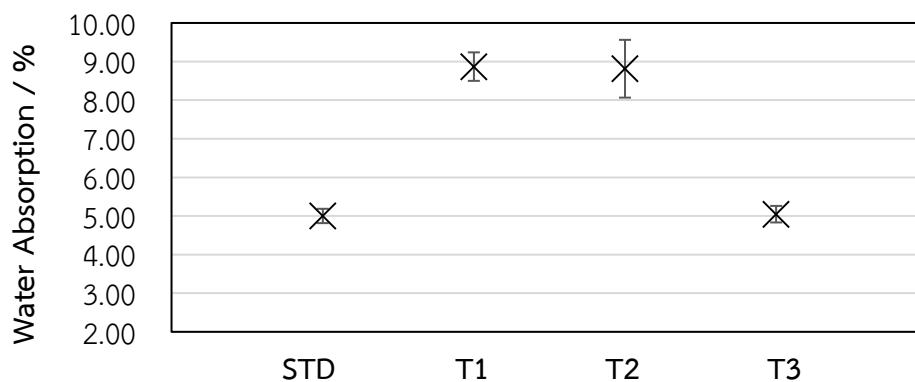
4.3 ผลการศึกษาการขึ้นรูปกระเบื้องดินเผาสูตรมาตรฐานและกระเบื้องที่มีเก้าหนักลิไกไนต์ผสมในอัตราส่วนร้อยละ 50

ผลการศึกษาพบว่า การขึ้นรูปกระเบื้องดินเผาที่มีส่วนผสมของเก้าหนักลิไกไนต์อยู่มกานั้น จะไม่สามารถขึ้นรูปได้ดี เนื่องจาก ตัววัตถุดิบของเก้าหนักลิไกไนต์เองไม่มีความเหนียวในตัวที่จะยึดตัวกันเองเมื่อทำการอัดขึ้นรูป จึงจำเป็นต้องใช้ดินดำ หรือดินขาวในการช่วยให้สามารถที่จะขึ้นรูปขึ้นงานได้ดี โดยหากเพิ่มความชื้นในดินต่ำกว่า 7% จะส่งผลให้ขึ้นงานไม่สามารถขึ้นรูปได้ หรือหากเพิ่มความชื้นในดินเกิน 15% จะส่งผลให้ขึ้นงานไม่สามารถถอดออกจากแม่แบบได้

4.4 ผลการดูดซึมน้ำของกระเบื้องดินเผาสูตรมาตรฐานและกระเบื้องที่มีเก้าหนักลิไกไนต์ผสมในอัตราส่วนร้อยละ 50

รูปที่ 4.2 แสดงการดูดซึมน้ำของขึ้นงาน โดยพบว่ามีค่าการดูดซึมน้ำของ T1 และ T2 เพิ่มขึ้นสูงกว่ามาตรฐานกระเบื้องสโตนแวร์กลุ่มการดูดซึมน้ำปานกลางค่อนข้างต่ำ ซึ่งมีค่าการดูดซึมน้ำไม่เกิน 6% [29] โดยการเพิ่มปริมาณเก้าหนักลิไกไนต์ และ ลด ปริมาณดินขาวลงโดยที่ไม่เพิ่มวัตถุดิบอื่นของ T1 นั้นส่งผลให้ค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นเนื่องจาก อาจมีรูพรุนภายในสูง เช่นเดียวกันกับ T2 ซึ่งพบว่าการเติม Na-Feldspar เข้าไปส่งผลให้การดูดซึมน้ำลดลง[30] แต่ยังไม่ดีพอเทียบกับกระเบื้องมาตรฐาน ในสูตร T3 จึงเติม ทรายละเอียดเข้าไปช่วยให้ขึ้นงานเกิดการหลอมตัวที่ดีขึ้น[31] ส่งผลให้

การดูดซึมน้ำน้อยลงและใกล้เคียงกับกระเบื้องมาตรฐาน ซึ่งสอดคล้องกับการหดตัวจากการเผาที่มีค่าเพิ่มขึ้น[32] ตามลำดับ T1 T2 T3



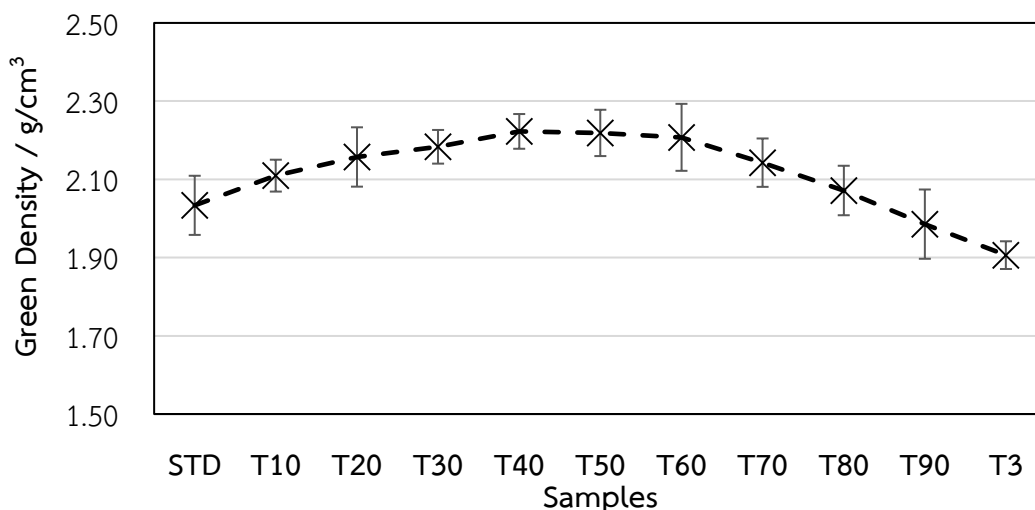
รูปที่ 4.2 การดูดซึมน้ำของกระเบื้องมาตรฐาน T1 T2 และ T3

4.5 ผลการศึกษาการขึ้นรูปกระเบื้องที่ใช้สมบัติของเถ้าหนักลิคนิตในการด้านการแอ่นตัว

เนื่องจากการขึ้นรูปกระเบื้องดินเผาในครั้งนี้เกิดจากการนำกระเบื้องสูตรมาตรฐานมาผสมกับกระเบื้องดินเผาที่มีการผสมเถ้าหนักลิคนิตแล้ว ทำให้การขึ้นรูปขึ้นงานนั้นสามารถขึ้นรูปได้ง่ายแล้วสามารถใช้ความชื้นในการขึ้นรูปได้ตั้งแต่ 5-7% ของน้ำหนักวัตถุดิบ โดย STD จะเป็นสูตรที่ขึ้นรูปง่ายที่สุด แต่การเพิ่มความชื้นที่มากเกินไป 15% จะส่งผลให้ชิ้นงานไม่สามารถถอดออกจากแม่แบบได้เช่นเดียวกัน

4.6 ผลการศึกษาความหนาแน่นก่อนการเผา

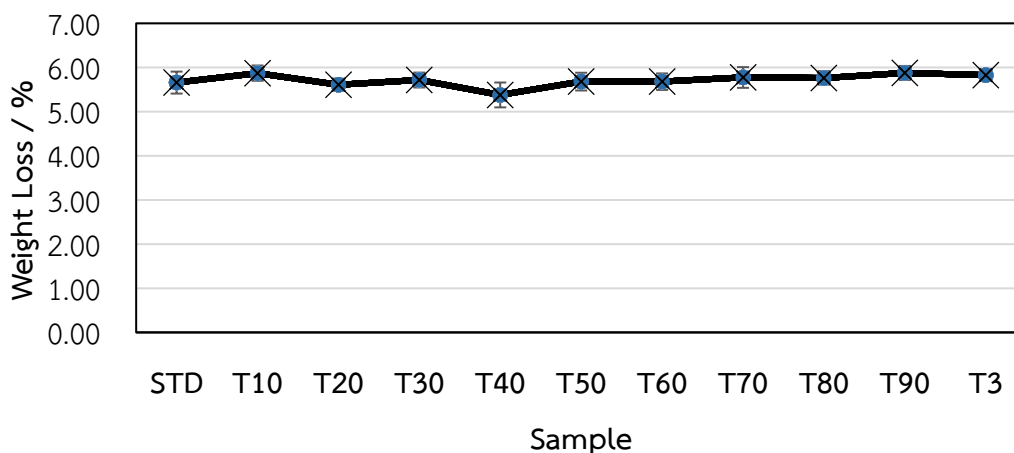
การศึกษาความหนาแน่นก่อนการเผา (green density) เนื่องจากการเพิ่มปริมาณของเถ้าหนักลิแกนด์เข้าไปในกระเบื้องดินเผาของแต่ละอัตราส่วน ส่งผลให้การอัดขึ้นรูปชิ้นงาน จากรูปที่ 4.3 กระเบื้องที่มีส่วนผสมของ T3 ตั้งแต่ 10% ถึง 60% จะได้กระเบื้องที่มีความหนาแน่นก่อนเผาสูงขึ้น เนื่องจากขนาดของผงที่มีเถ้าหนักลิแกนด์ผสมอยู่นั้นจะมีลักษณะที่หยาบ และใหญ่กว่า เมื่อเทียบกับลักษณะของผงที่ใช้ในการผลิตกระเบื้องดินเผาสูตรมาตรฐาน เมื่อนำ วัสดุดิบทั้งสองมาผสมกัน และนำมาอัดขึ้นรูปทำให้เกิดการจัดเรียงตัวกันของอนุภาค และส่งผลให้เกิดความหนาแน่นที่ดียิ่งขึ้น[33] แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของ T3 มากขึ้น จะเห็นได้ว่าความหนาแน่นก่อนเผานั้นลดลง เนื่องจาก เกิดการเพิ่มปริมาณของขนาดอนุภาคใหญ่มากขึ้น ส่งผลให้การจัดเรียงตัวกันของอนุภาคนั้นแย่ง



รูปที่ 4.3 ความหนาแน่นก่อนเผาของกระเบื้องมาตรฐาน และกระเบื้องผสม T3 ในอัตราส่วนต่าง ๆ

4.7 ผลการศึกษาการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นงาน

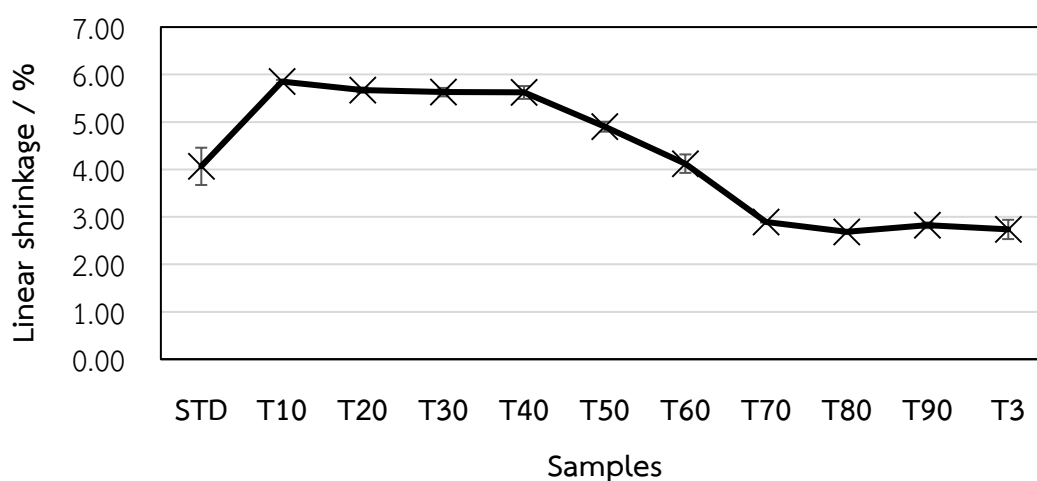
การศึกษาการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นงาน (Weight loss) เนื่องจากการเพิ่มปริมาณของเถ้าหนักลิแกนด์เข้าไปในแต่ละอัตราส่วน เข้าไปในกระเบื้องดินเผา ทำให้อินทรีย์สารในเนื้อกระเบื้องนั้นเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนของ T3 ที่มากขึ้น โดยเมื่ออัตราส่วนของเถ้าหนักลิแกนด์สูงนั้น จากรูปที่ 4.4 ไม่ได้ส่งผลต่อการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นงาน มากนัก[34]



รูปที่ 4.4 น้ำหนักก่อนเผา และหลังเผาของกระเบื้องมาตรฐาน และ ใน T3 อัตราส่วนต่าง ๆ

4.8 ผลการศึกษาการหดตัวเชิงเส้น

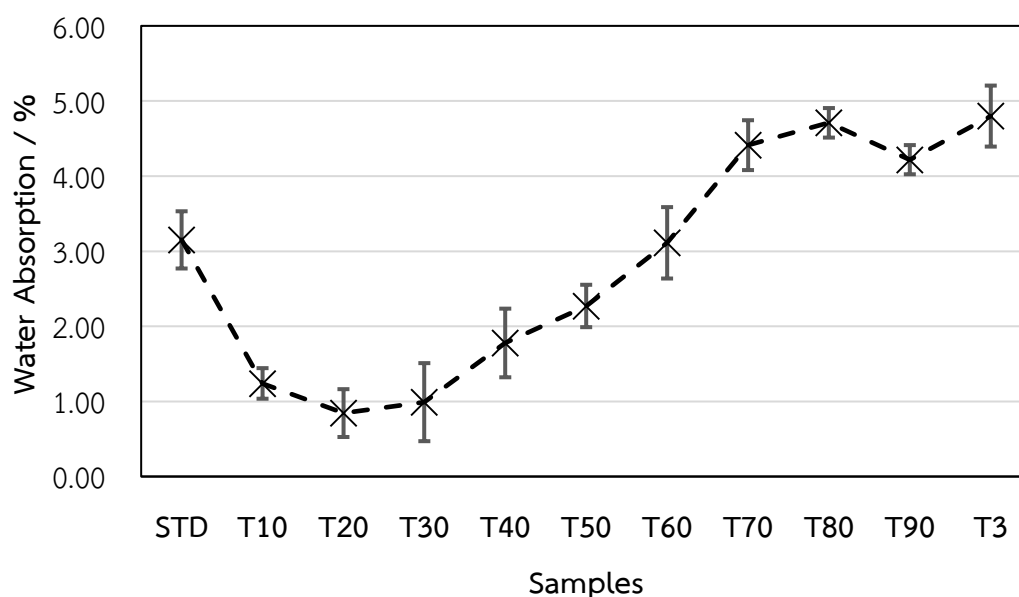
การศึกษาการหดตัวเชิงเส้น (Linear shrinkage) ได้จากรูปที่ 4.5 จากการศึกษาที่เพิ่มปริมาณของเส้นใยแก้วนำไฟเบอร์เข้าไปในสูตรกระเบื้องมาตรฐานพบว่า เกิดการหดตัวที่ต่างกันอย่างเห็นได้ชัด เมื่อเทียบระหว่าง สูตร STD และ T10 เนื่องจากปริมาณของเส้นใยแก้วนำไฟเบอร์นั้นมีน้อยเมื่อเทียบกับเนื้อที่ส่วนใหญ่ของกระเบื้อง แต่เมื่อเพิ่มปริมาณของเส้นใยแก้วนำไฟเบอร์มากขึ้น จะสังเกตเห็นว่าการหดตัวที่น้อยลง เนื่องจากเส้นใยแก้วนำไฟเบอร์นั้นสามารถที่จะเกิดผลึกของอนอร์ไทต์ได้ ซึ่งสมบัติของตัวผลึกนั้นเองสามารถที่จะเป็นโครงสร้างให้กับชิ้นงาน[35-37]และช่วยให้เกิดการหดตัวที่น้อยลง ดังนั้นการที่เราเพิ่มส่วนผสมของ T3 เข้าไปในกระเบื้องสูตรมาตรฐานมากขึ้น ส่งผลให้ปริมาณของเส้นใยแก้วนำไฟเบอร์ในกระเบื้องนั้นมากขึ้นเช่นกัน ทำให้ชิ้นงานที่มีการผสมเส้นใยแก้วนำไฟเบอร์อยู่มากนั้นเกิดการหดตัวที่น้อยลง



รูปที่ 4.5 การหดตัวเชิงเส้นของกระเบื้องมาตรฐาน และ กระเบื้องที่ผสม T3 ในอัตราส่วนต่าง ๆ

4.9 ผลการศึกษาการดูดซึมน้ำ

การศึกษาการดูดซึมน้ำ (Water absorption) ได้จากรูปที่ 4.4 และ 4.5 พบว่า ชิ้นงานทดลองที่มีการเพิ่มปริมาณของเส้นใยลิกไนต์นั้นจะมีการหดตัวที่น้อย และจะมีน้ำหนักก่อนเผาและหลังเผาที่แตกต่างกัน มากน้อยขึ้นอยู่กับ ปริมาณของเส้นใยลิกไนต์ที่เพิ่มขึ้นในสูตรกระเบื้องมาตรฐาน ส่งผลให้เกิดการดูดซึมน้ำเป็นไปตามรูปที่ 4.6 จะเห็นได้ว่า อัตราส่วนที่มีการเพิ่มเส้นใยลิกไนต์ในสูตรที่ T10 T20 T30 จะมีการดูดซึมน้ำที่น้อยลงอย่างเห็นได้ชัด เมื่อเทียบกับกระเบื้องสูตรมาตรฐาน STD เนื่องจากการหดตัวที่เพิ่มขึ้น และการเกิดของผลึกอนอร์โทไซต์นั้นยังไม่มากพอที่จะเป็นโครงสร้าง และเมื่อมีการเพิ่มอัตราส่วนของเส้นใยที่มากขึ้น จะเห็นได้ว่ามีการหดตัวเชิงเส้นที่น้อยลง แต่พบว่ามี อัตราการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของชิ้นงานหลังเผามากขึ้น นั้นส่งผลให้สามารถเกิดช่องว่างภายในชิ้นงานทำให้เกิดการดูดซึมน้ำที่มากขึ้น เนื่องจากอนอร์โทไซต์ที่มีจำนวนมากในเส้นใยนั้นได้จัดเรียงตัวเป็นโครงสร้าง[2, 38, 39] ทำให้ชิ้นงานกระเบื้องนั้นไม่เกิดการหดตัวเชิงเส้น แต่ในทางกลับกันกลับทำให้เกิดช่องว่างภายในชิ้นงาน และทำให้ชิ้นงานนั้นดูดซึมน้ำมากขึ้น[39] โดยการดูดซึมน้ำของชิ้นงานมีค่าเฉลี่ยใกล้เคียงกับกระเบื้องดินเผาสูตรมาตรฐาน

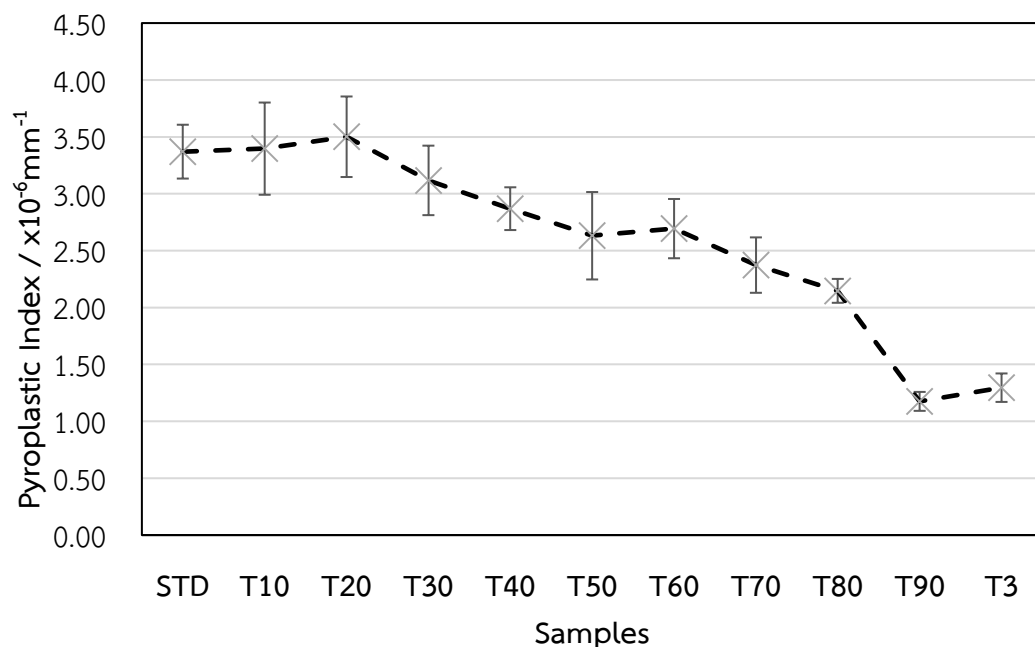


รูปที่ 4.6 การดูดซึมน้ำของกระเบื้องมาตรฐาน และ กระเบื้องที่ผสม T3 ในอัตราส่วนต่าง ๆ

4.10 ผลการศึกษาสมบัติการต้านการแอ่นตัว

การศึกษาสมบัติการต้านการแอ่นตัว (pyroplastic index: PI) ได้จากการคำนวณจากสมการที่ 3.5 ได้ผลออกมาดังรูปที่ 4.7 จากการทดลองพบว่ากระเบื้องที่มีส่วนผสมของเส้นใยลิกไนต์ จะมี

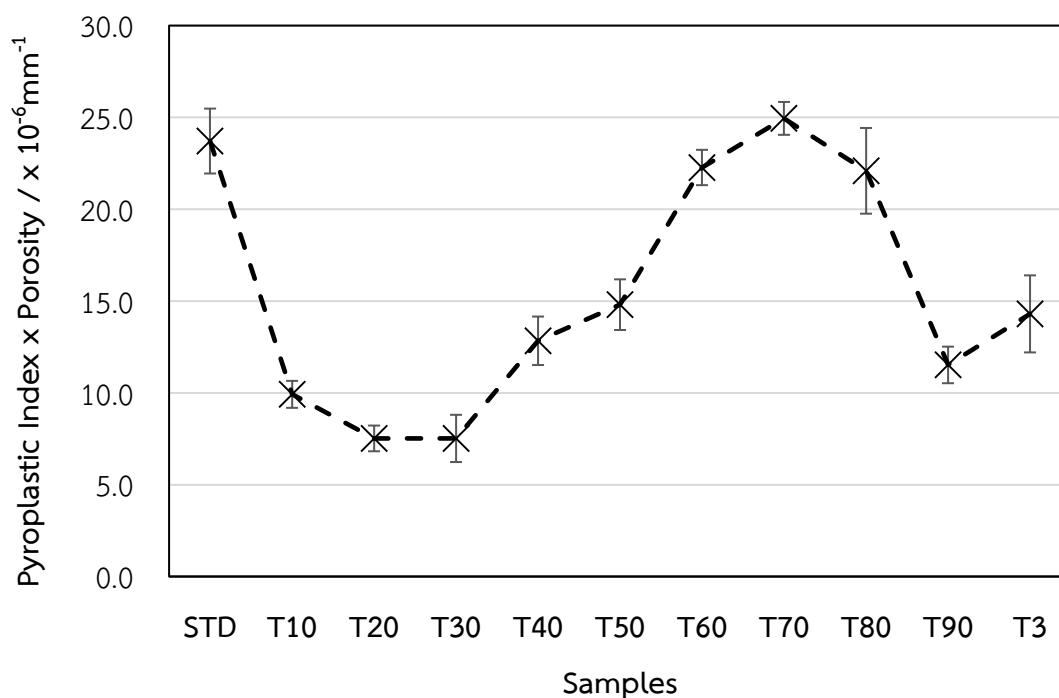
ค่าสมบัติการแอ่นตัวที่ต่ำกว่า ซึ่งเป็นไปตามสมมุติฐานว่า ในเก้าहन้กนั้นมืผลึกอนอร์ไทต์ซึ่งเป็นตัวที่สามารถช่วยไม่ให้ชิ้นงานนั้นเกิดการแอ่นตัว โดยสามารถสรุปได้จากสูตรมาตรฐานนั้นมีค่าการแอ่นตัวที่ 3.37×10^{-6} ต่อมิลลิเมตรเมื่อทำการเติมส่วนผสม T3 เข้าไป 30% พบว่า ชิ้นงานนั้นมีการแอ่นตัวที่น้อยลงเหลือ 3.18×10^{-6} ต่อมิลลิเมตรและเมื่อเทียบกับชิ้นงานที่มี T3 ผสมอยู่ 60% พบว่ามีค่าการแอ่นตัวที่ลดลงไปเรื่อย ๆ ตามปริมาณของอัตราส่วนเก้าहन้กโลกไนต์ที่เพิ่มขึ้น ข้อการเกิดการต้านการแอ่นตัวนั้น เกิดเนื่องจากการที่มีปริมาณของผลึกอนอร์ไทต์มากขึ้น ทำให้ความหนืดของของเหลวที่เกิดในการเผาไหม้มีความหนืดสูงขึ้น[12, 40-42]ช่วยให้ชิ้นงานนั้นเกิดการแอ่นตัวได้ช้าลง จนเสร็จสิ้นกระบวนการเผา ทำให้ชิ้นงานที่มีผลึกอนอร์ไทต์ปริมาณมากนั้น มีการแอ่นตัวที่น้อยกว่าชิ้นงานที่ไม่มีผลึกอนอร์ไทต์หรือมีผลึกอนอร์ไทต์ในปริมาณที่น้อยกว่า[43-45]



รูปที่ 4.7 สมบัติการต้านการแอ่นตัวของกระเบื้องมาตรฐานและ T3 อัตราส่วนต่าง ๆ

4.11 ผลการศึกษาสมบัติการต้านการแอ่นตัวเทียบรูพรุน

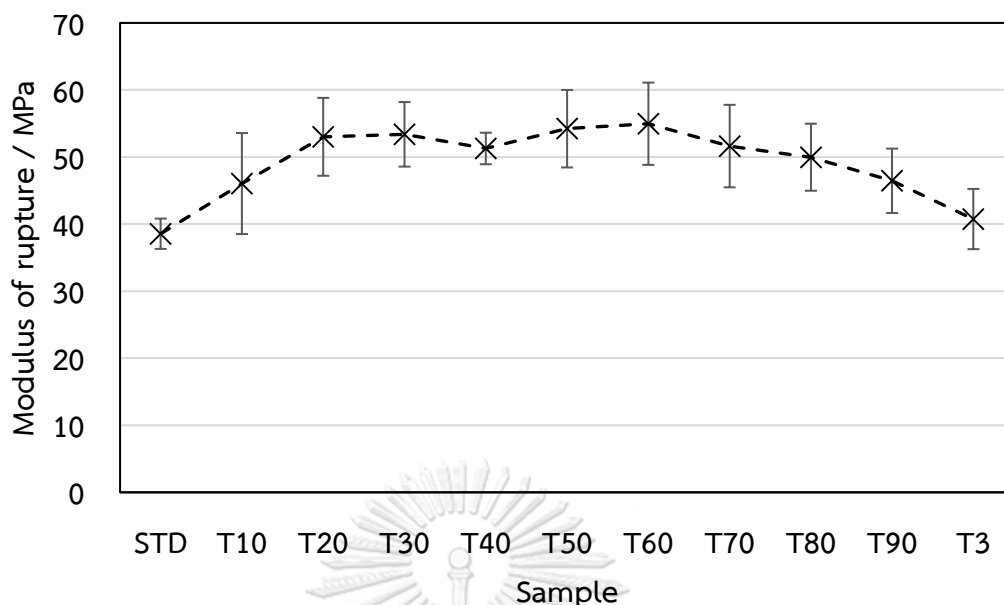
การศึกษาสมบัติการต้านการแอ่นตัวเทียบรูพรุน (Pyroplastic Index \times Porosity) ได้จากการคำนวณจากสมการที่ 3.5 ได้ผลที่ได้มาคำนวณกับความพรุนตัวของแต่ละชิ้นงานเพื่อควบคุมตัวแปรที่ส่งผลต่อการแอ่นตัวของชิ้นงานทำให้ผลที่ได้เป็นไปตามรูปที่ 4.8 จะสังเกตได้ว่าชิ้นงานมีแนวโน้มของการแอ่นตัวมากขึ้นจะแปรผันตามอัตราการดูดซึมน้ำของชิ้นงาน



รูปที่ 4.8 สมบัติการต้านการแอ่นตัวเทียบรูพรุนของกระเบื้องมาตรฐาน และ กระเบื้องที่ผสม T3 อัตราส่วนต่าง ๆ

4.12 ผลการศึกษาความต้านแรงดัดโค้งหลังการเผา

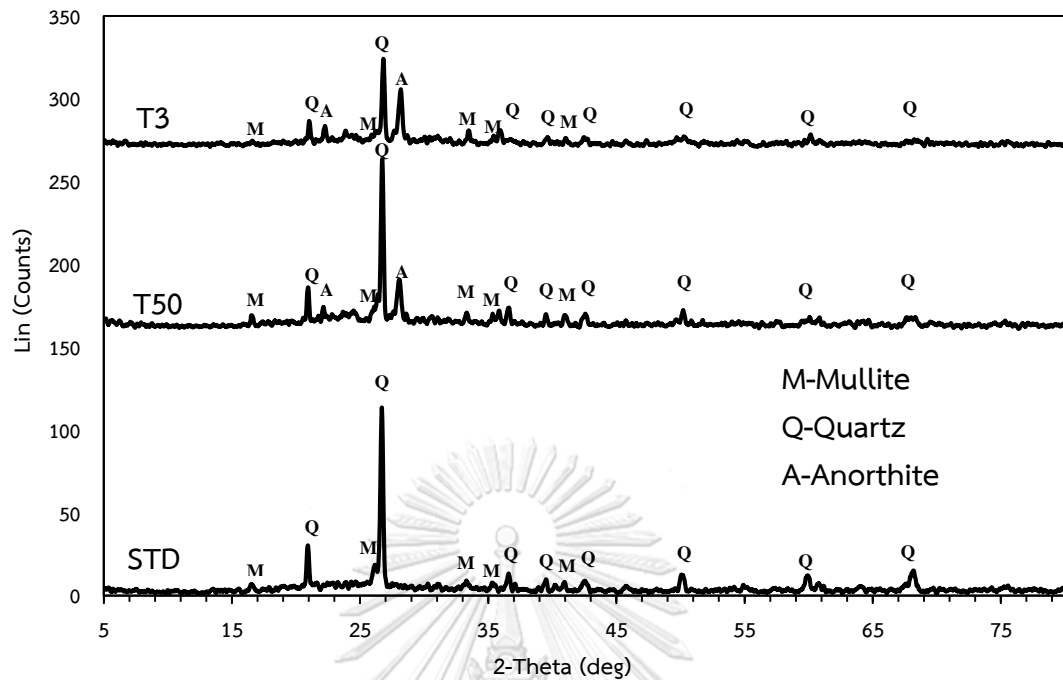
จากรูปที่ 4.9 พบว่ากระเบื้องสุตรมาตรฐานจะสามารถรับแรงดัดโค้งได้ที่ 38.56 MPa และเมื่อเติมถ้าหนักลิกลินต์ลงไปในส่วนผสม พบว่าความสามารถในการรับแรงดัดโค้งสูงขึ้น เป็น 40.76 MPa ถึง 54.97 MPa เนื่องจากการเติมถ้าหนักลิกลินต์นั้น ช่วยให้เกิดผลึกอนอร์ไทต์ขึ้นในเนื้อชิ้นงาน ส่งผลให้ชิ้นงานนั้นสามารถต้านทานแรงดัดโค้งได้สูงขึ้น ทำให้ชิ้นงานนั้นมีความแข็งแรงมากขึ้น ในช่วงแรกของการเติม T3 เป็นส่วนผสมพบว่า ชิ้นงานนั้นสามารถต้านทานความต้านแรงดัดโค้งได้สูงขึ้น เนื่องจากการที่ชิ้นงานที่มี T3 ผสมอยู่ร้อยละ 10 ถึง 60 นั้นสามารถขึ้นรูปได้ง่าย และมีความหนาแน่นก่อนการเผาที่สูงส่งผลให้ชิ้นงานในสูตรนี้สามารถรับแรงดัดโค้งได้สูงขึ้นเช่นกัน แต่เมื่อเพิ่ม T3 เป็นร้อยละ 70 ถึง 90 ซึ่งเป็นสูตรที่มีค่าความหนาแน่นก่อนเผานั้นต่ำลงส่งผลให้ค่าความต้านแรงดัดโค้งนั้นต่ำลงเช่นกัน อย่างไรก็ตาม ชิ้นงานที่มี T3 ผสมอยู่ร้อยละ 70 ถึง 90 ก็ยังมีความสามารถในการรับแรงดัดโค้งได้สูงกว่ากระเบื้องดินเผาสูตรมาตรฐาน



รูปที่ 4.9 ความเค้นแรงดัดโค้งหลังการเผา ของกระเบื้องมาตรฐาน และกระเบื้องที่ผสม T3 อัตราส่วนต่าง ๆ

4.13 ผลการศึกษาโครงสร้างผลึกของแผ่นกึ่งลิไกไนต์

ผลการศึกษาองค์ประกอบของผลึกด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (XRD) ของกระเบื้องสูตร STD T50 และ T3 ดังรูปที่ 4.9 พบว่า เฟสที่พบในกระเบื้องดินเผาสูตร STD จะพบเพียงมุลไลต์และ ควอตซ์ และจะไม่พบอนอร์ไทต์เกิดขึ้นในชิ้นงาน แต่ในชิ้นงาน T50 และ T3 นั้นจะมีส่วนผสมของแผ่นกึ่งลิไกไนต์ พบเฟสของอนอร์ไทต์ ควอตซ์ และมุลไลต์ซึ่งอนอร์ไทต์นั้นเป็นปัจจัยหลักที่เป็นตัวช่วยในการให้เกิดการแอนตัวที่น้อยลง โดยอัตราส่วนของอนอร์ไทต์ที่พบใน T3 นั้นจะมีมากกว่าที่พบใน T50 ซึ่งเป็นตัว ทำให้ชิ้นงานเกิดการต้านการแอนตัวได้ดีกว่าชิ้นงานอัตราส่วนอื่น ๆ

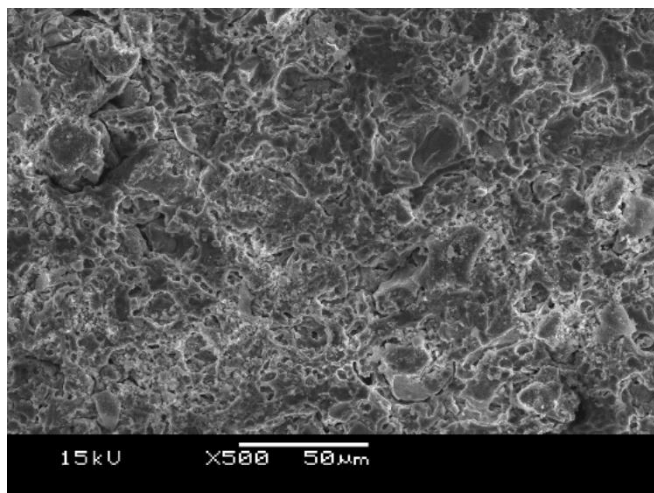


รูปที่ 4.10 กราฟการวิเคราะห์โดยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์
ของกระเบื้อง STD T50 และ T3

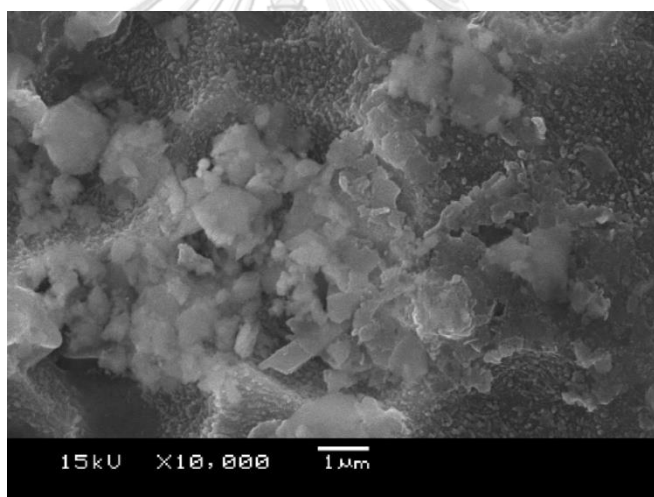
4.14 ผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาค

4.14.1 กระเบื้องดินเผาสูตรมาตรฐาน STD

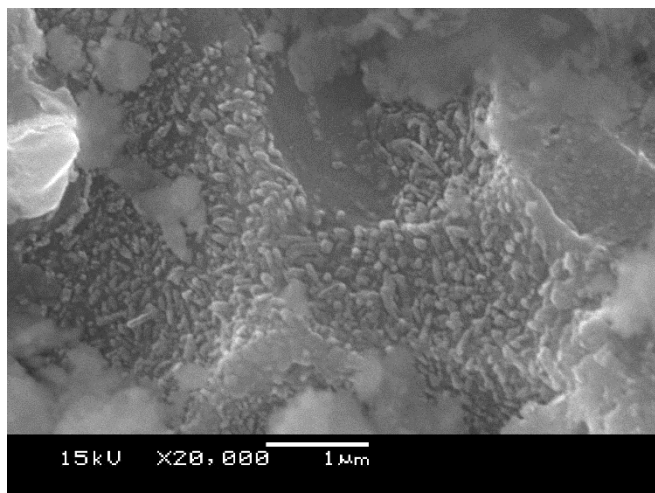
โครงสร้างจุลภาคของกระเบื้องดินเผาสูตรมาตรฐานที่กำลังขยาย 500 เท่า รูปที่ 4.11 พบว่าพื้นผิวของชิ้นงานที่ผ่านการกัดกรด จะมีลักษณะโครงสร้างการจัดเรียงตัว คล้าย คอตซ์ และเนื้อแก้ว กระจายตัวอยู่ทั่วผิวชิ้นงาน และเมื่อขยายเข้าไปที่กำลังขยาย 10,00 เท่า รูปที่ 4.12 พบว่ามีลักษณะของผลึกเล็ก ๆ คล้ายเมล็ดข้าว เกิดขึ้นมีขนาดความยาวประมาณ 0.2-0.3 ไมครอน ลักษณะของผลึกที่เกิดขึ้นนั้นมีความคล้ายคลึงกับมุลไลต์หรืออนอร์ไทต์และเมื่อใช้กำลังขยายที่ 20,000 เท่า รูปที่ 4.13 จะสามารถเห็นหน้าตาของผลึกได้อย่างชัดเจนยิ่งขึ้น



รูปที่ 4.11 ภาพกำลังขยาย 500 เท่า ของชิ้นงาน STD

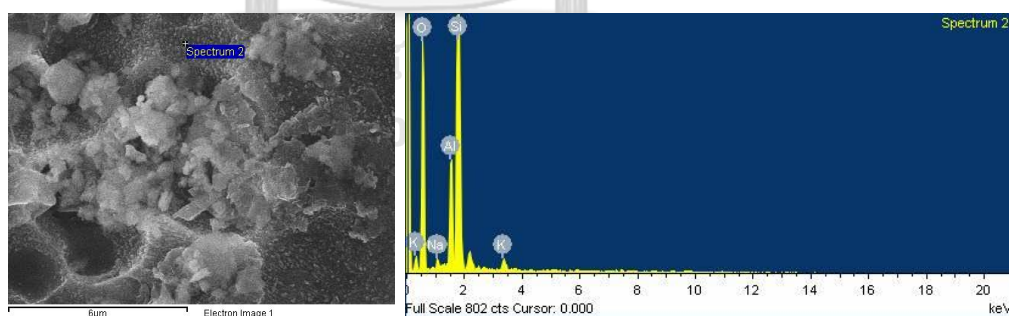


รูปที่ 4.12 ภาพกำลังขยาย 10,000 เท่า ของชิ้นงาน STD



รูปที่ 4.13 ภาพกำลังขยาย 20,000 เท่า ของชิ้นงาน STD

จากโครงสร้างจุลภาคของอนอร์ไทต์และมุลไลต์ที่คล้ายคลึงกัน จึงได้ใช้เทคนิคการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ (Energy Dispersive X-ray : EDS) รูปที่ 4.14 พบว่าแท่งผลึกที่มีความยาวขนาด 0.2-0.3 ไมครอน นั้นมีองค์ประกอบทางเคมีตรงกับมุลไลต์และไม่พบธาตุ Ca ซึ่งเป็นธาตุที่มีในอนอร์ไทต์จึงสรุปได้ว่า ในชิ้นงานกระเบื้องสูตรมาตรฐานนั้นไม่พบผลึกของอนอร์ไทต์ที่เป็นตัวช่วยให้เกิดการต้านการแอ่นตัวของชิ้นงาน

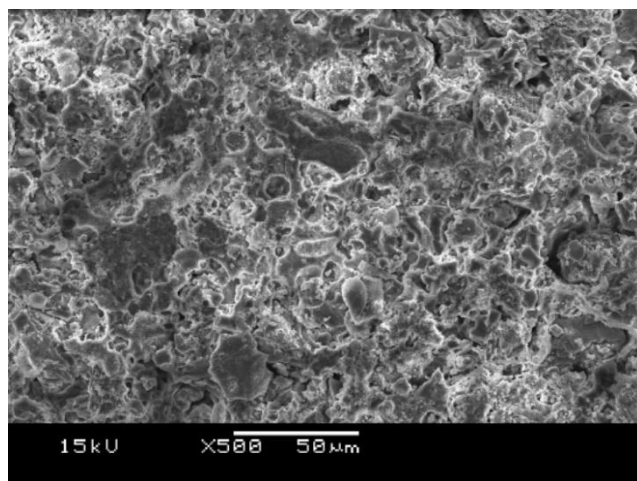


รูปที่ 4.14 ภาพกำลังขยาย 20,000 เท่า ของชิ้นงาน STD และผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ

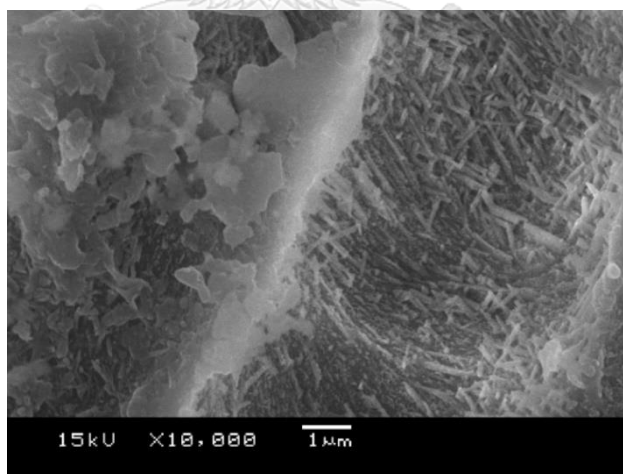
4.14.2 กระเบื้องที่มีเกณฑ์กลไกไนต์ผสม T3 ผสมอยู่อัตราส่วนร้อยละ 20

โครงสร้างจุลภาคของกระเบื้องดินเผาสูตร T20 ที่กำลังขยาย 500 เท่า รูปที่ 4.15 พบว่าพื้นผิวของชิ้นงานที่ผ่านการกัดกรวด จะมีลักษณะโครงสร้างการจัดเรียงตัว คล้ายควอตซ์ และเนื้อแก้ว กระจ่ายตัวอยู่ทั่วผิวชิ้นงาน และเมื่อขยายไปที่กำลังขยาย 10,000 เท่า รูปที่ 4.16 พบว่ามีลักษณะ

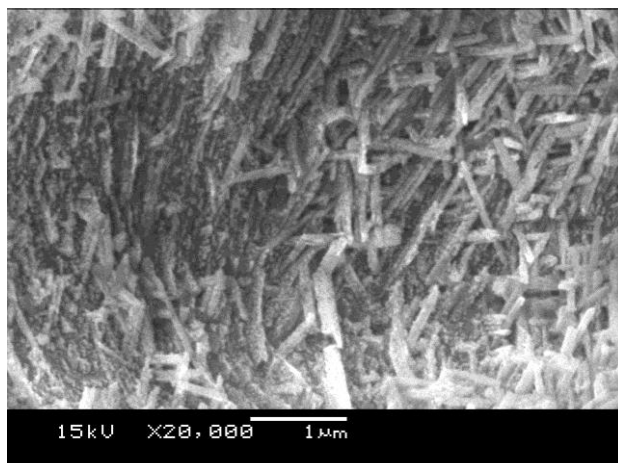
ของผลึกทรงคล้ายเข็ม เกิดขึ้นมีขนาดความยาวประมาณ 1 - 1.5 ไมครอน ลักษณะของผลึกที่เกิดขึ้นนั้นมีความคล้ายคลึงกับมุลไลต์หรืออนอร์ไทต์และเมื่อใช้กำลังขยายที่ 20,000 เท่า รูปที่ 4.17 จะสามารถเห็นหน้าตาของผลึกได้อย่างชัดเจนยิ่งขึ้นเมื่อเทียบกับผลึกที่พบในกระเบื้องสูตร STD



รูปที่ 4.15 ภาพกำลังขยาย 500 เท่า ของชิ้นงาน T20

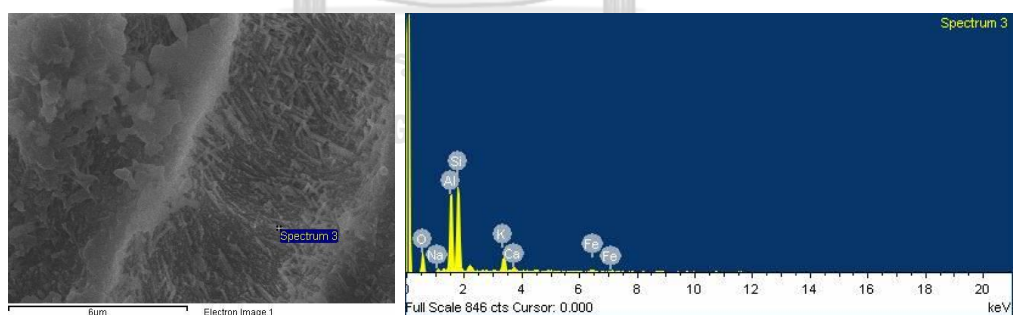


รูปที่ 4.16 ภาพกำลังขยาย 10,000 เท่า ของชิ้นงาน T20

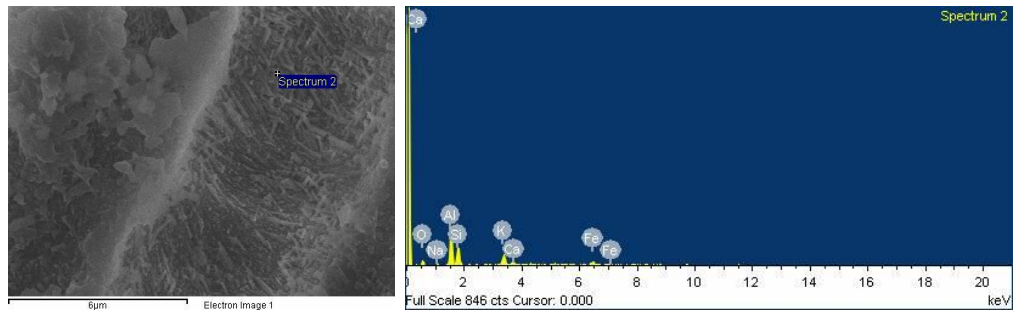


รูปที่ 4.17 ภาพกำลังขยาย 20,000 เท่า ของชิ้นงาน T20

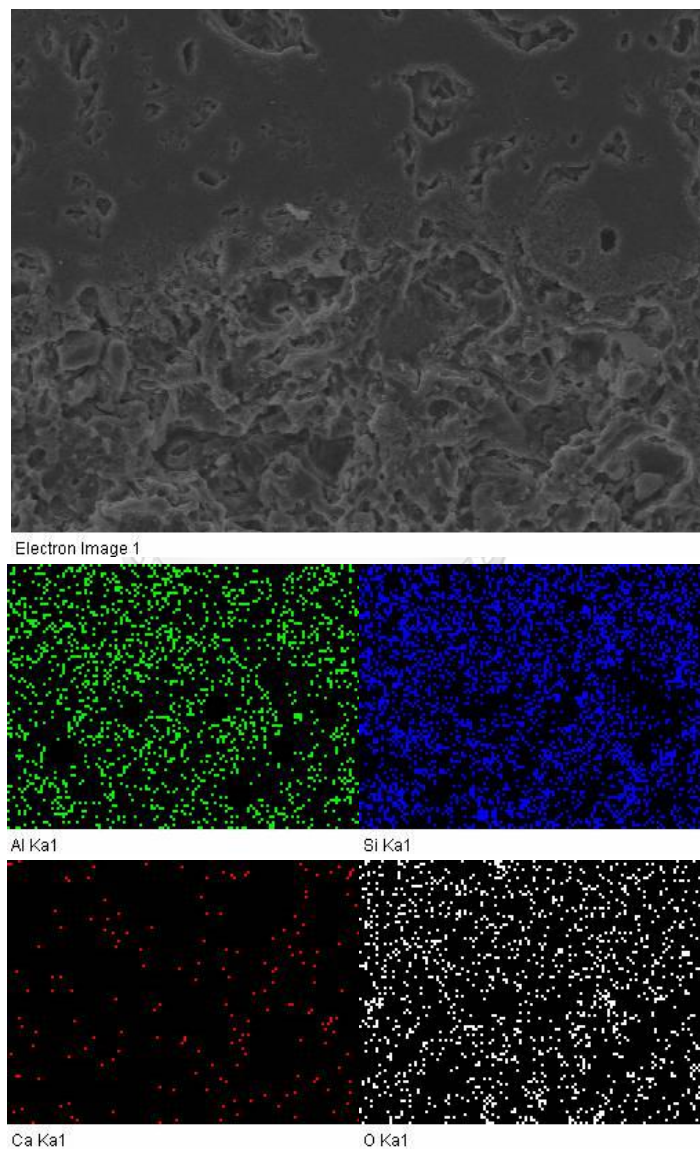
จากโครงสร้างจุลภาคของอนอร์ไทต์และมุลไลต์ที่คล้ายคลึงกัน จึงได้ใช้เทคนิคการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ (Energy Dispersive X-ray : EDS) รูปที่ 4.18 พบว่าแท่งผลึกที่มีความยาวขนาด 1 - 1.5 ไมครอน นั้นมีพบธาตุ Ca ซึ่งเป็นธาตุที่มีในอนอร์ไทต์เล็กน้อย แต่สามารถพบการกระจายของ Ca บริเวณอื่น เช่นกัน รูปที่ 4.19 และมีการกระจายตัวเล็กน้อย จาก Mapping รูปที่ 4.20 จึงสรุปได้ว่า ชิ้นงานกระเบื้องสูตร T20 นั้นอาจมีผลึกของอนอร์ไทต์เกิดขึ้น แต่เป็นปริมาณที่น้อย ปะปนอยู่กับผลึกของมุลไลต์จึงส่งผลให้กระเบื้องสูตร T20 นั้นมีการแอนตัวที่น้อยกว่าสูตร STD



รูปที่ 4.18 ภาพกำลังขยาย 20,000 เท่า ของชิ้นงาน T20 และผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ



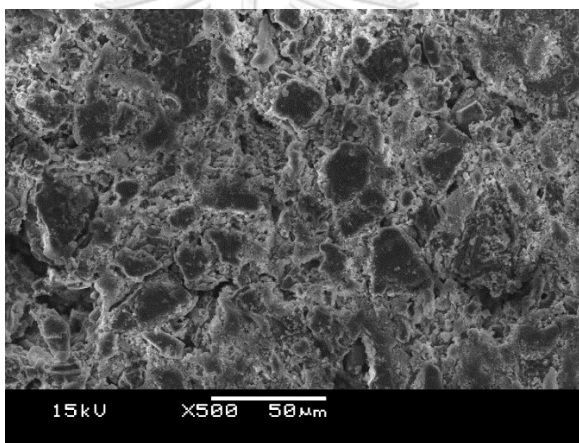
รูปที่ 4.19 ภาพกำลังขยาย 20,000 เท่า ของชิ้นงาน T20 และผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ



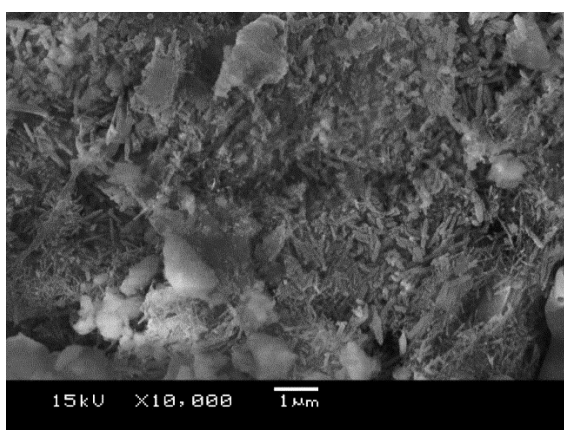
รูปที่ 4.20 ภาพกำลังขยาย 500 เท่า ของชิ้นงาน T20 และผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณแบบ Mapping

4.14.3 กระเบื้องที่มีเส้นใยคาร์บอนผสม T3 ผสมอยู่อัตราส่วนร้อยละ 40

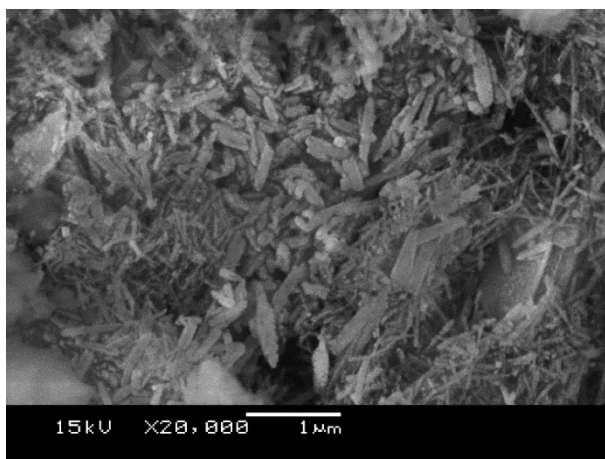
โครงสร้างจุลภาคของกระเบื้องดินเผาสูตร T40 ที่กำลังขยาย 500 เท่า รูปที่ 4.21 พบว่าพื้นผิวของชิ้นงานที่ผ่านการกัดกรด จะมีลักษณะโครงสร้างการจัดเรียงตัว คล้าย คออดซ์ และเนื้อแก้ว กระจายตัวอยู่ทั่วผิวชิ้นงาน และเมื่อขยายไปที่กำลังขยาย 10,00 เท่า รูปที่ 4.22 พบว่ามีลักษณะของผลึกทรงคล้ายเข็ม เกิดขึ้นมีขนาดความยาวประมาณ 0.3 - 0.5 ไมครอน ซึ่งเห็นได้ชัดว่า ขนาดของผลึกนั้นเล็กลงเมื่อเทียบกับขนาดผลึกที่พบใน T20 ลักษณะของผลึกที่เกิดขึ้นนั้นมีความคล้ายคลึงกับ มุลไลต์หรืออนอร์ไทต์และเมื่อใช้กำลังขยายที่ 20,000 เท่า รูปที่ 4.23 จะสามารถพบผลึกได้อย่างชัดเจนยิ่งขึ้นเมื่อเทียบกับผลึกที่พบในกระเบื้องสูตร T20 จะพบว่าสูตรของ T40 นั้นมีความหนาแน่นของผลึกที่มากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด



รูปที่ 4.21 ภาพกำลังขยาย 500 เท่า ของชิ้นงาน T40

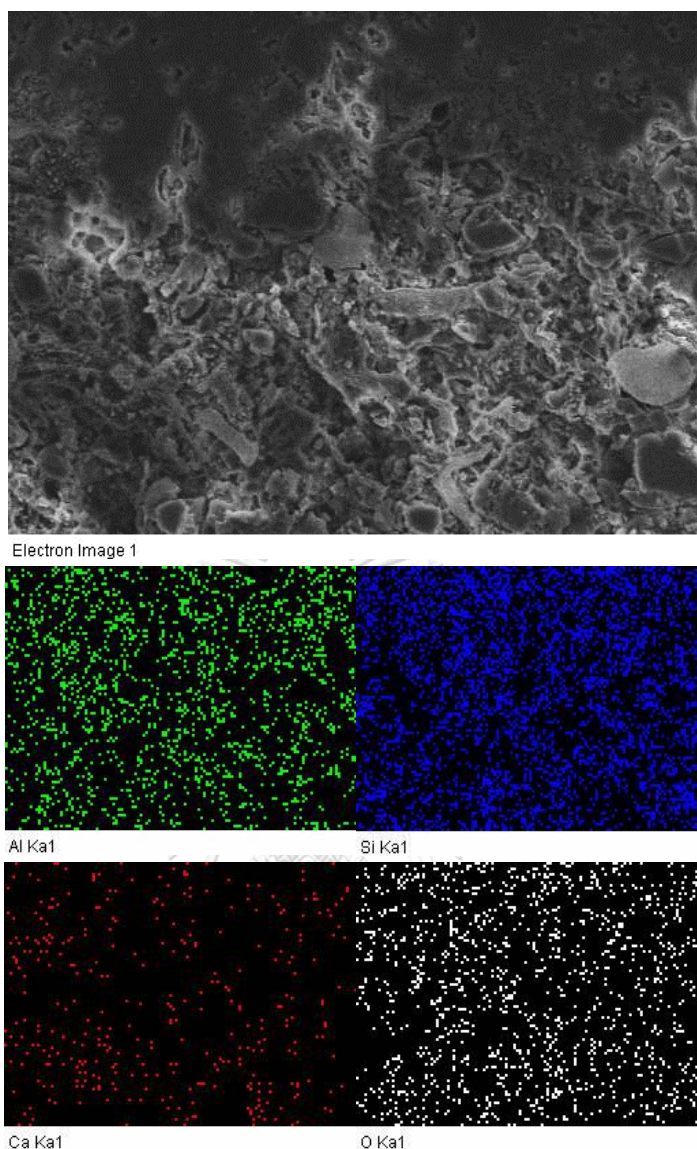


รูปที่ 4.22 ภาพกำลังขยาย 10,000 เท่า ของชิ้นงาน T40



รูปที่ 4.23 ภาพกำลังขยาย 20,000 เท่า ของชิ้นงาน T40

จากโครงสร้างจุลภาคของอนอร์ไทต์และมุลไลต์ที่คล้ายคลึงกัน ได้ใช้เทคนิคการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ (Energy Dispersive X-ray : EDS) รูปที่ 4.24 พบว่ามีการกระจายตัวของธาตุ Ca ซึ่งเป็นธาตุที่มีในอนอร์ไทต์กระจายตัวอยู่ที่ชิ้นงาน เมื่อเทียบกับการกระจายตัวใน T20 แสดงถึงการที่กระเบื้องดินเผา T40 นั้นมีการกระจายตัวของ Ca ที่มากขึ้น ส่งผลให้ ผลึกอนอร์ไทต์นั้นมากขึ้นตาม

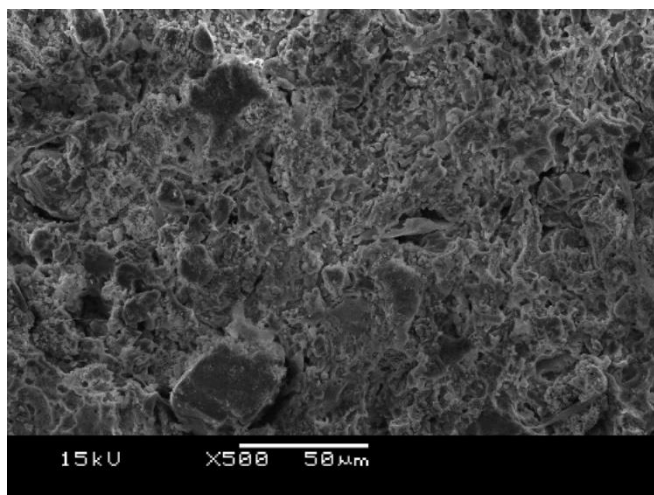


รูปที่ 4.24 ภาพกำลังขยาย 500 เท่า ของชิ้นงาน T40 และผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณแบบ Mapping

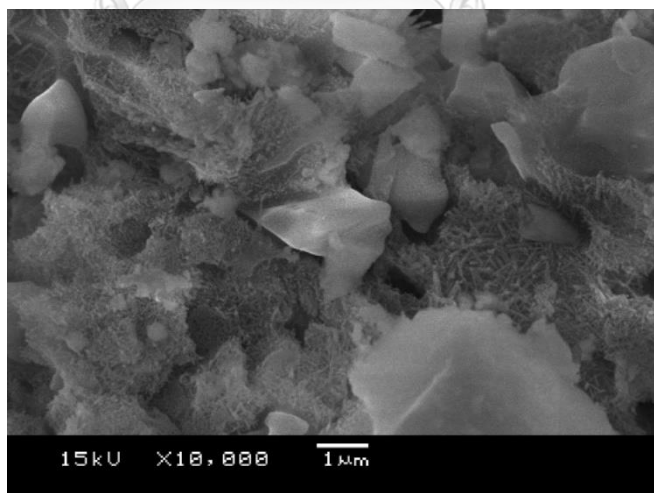
4.14.4 กระเบื้องที่มีเส้นใยคาร์บอนที่ผสม T3 อัตราส่วนร้อยละ 60

โครงสร้างจุลภาคของกระเบื้องดินเผาสูตร T60 ที่กำลังขยาย 500 เท่า รูปที่ 4.25 พบว่าพื้นผิวของชิ้นงานที่ผ่านการกัดกรวด จะมีลักษณะโครงสร้างการจัดเรียงตัว คล้าย คอตซ์ และเนื้อแก้ว กระจายตัวอยู่ทั่วผิวชิ้นงาน และเมื่อขยายไปที่กำลังขยาย 10,00 เท่า รูปที่ 4.26 พบว่ามีลักษณะของคอตซ์ กระจายอยู่ทั่วชิ้นงาน และระหว่างช่องของก้อนที่มีลักษณะคล้าย Quartz นั้นจะมีลักษณะของผลึกทรงคล้ายเข็ม เกิดขึ้นมีขนาดความยาวประมาณ 0.1 - 1.5 ไมครอน ลักษณะของผลึกที่เกิดขึ้นกระจายตัวอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งมีความคล้ายคลึงกับมุลด์หรืออนอร์ไทต์และเมื่อใช้กำลังขยาย

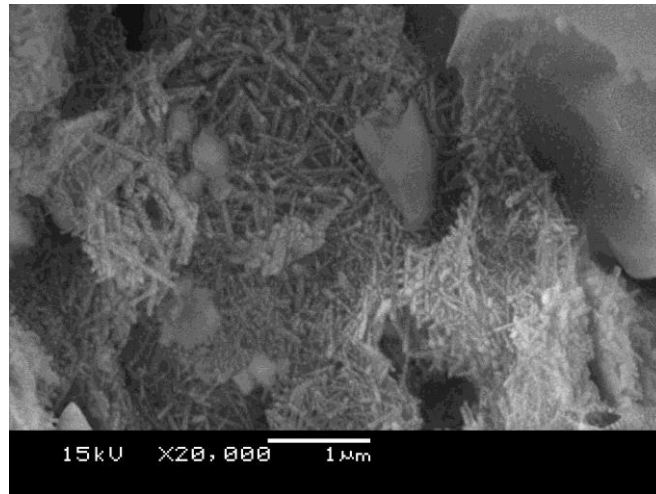
ที่ 20,000 เท่า รูปที่ 4.27 จะสามารถเห็นหน้าตาของผลึกได้อย่างชัดเจนยิ่งขึ้นและมีขนาดใหญ่เล็กปนกันไปเมื่อเทียบกับผลึกที่พบในกระเบื้องสูตร T20 และ T40 ซึ่งจะมีแค่ขนาดใหญ่อยู่รวมกัน หรือขนาดเล็กอยู่รวมกัน



รูปที่ 4.25 ภาพกำลังขยาย 500 เท่า ของชิ้นงาน T60

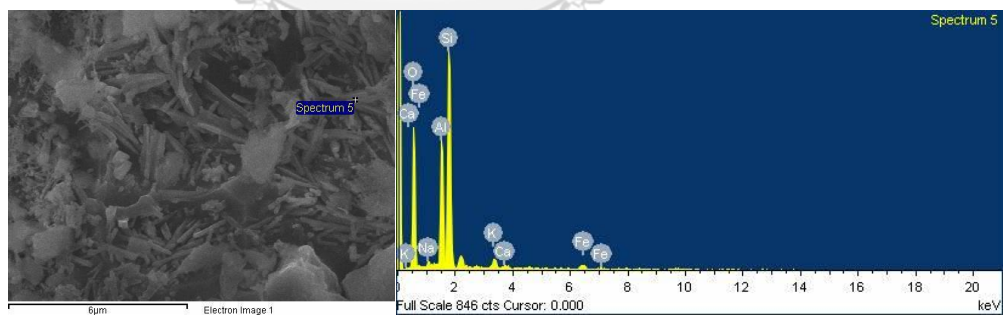


รูปที่ 4.26 ภาพกำลังขยาย 10,000 เท่า ของชิ้นงาน T60

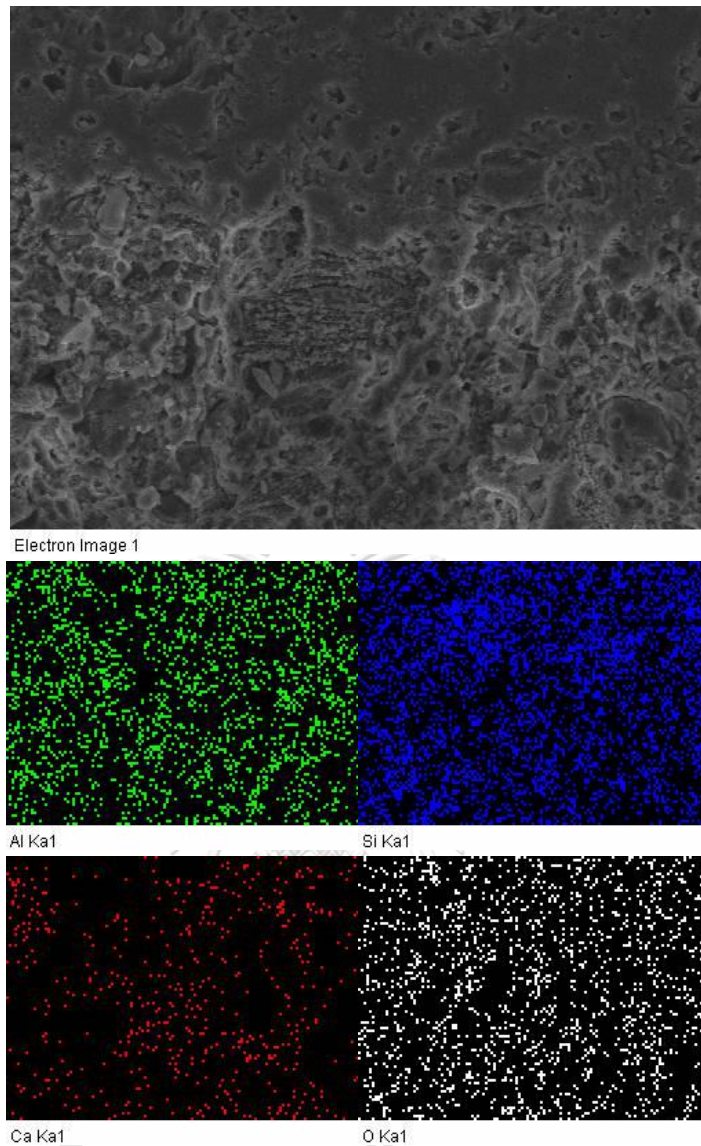


รูปที่ 4.27 ภาพกำลังขยาย 20,000 เท่า ของชิ้นงาน T60

จากโครงสร้างจุลภาคของอนอร์ไทต์และมุลไลต์ที่คล้ายคลึงกัน จึงได้ใช้เทคนิคการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ (Energy Dispersive X-ray : EDS) รูปที่ 4.28 พบว่าแท่งผลึกที่มีความยาวขนาด 0.1 - 1.5 ไมครอน นั้นมีพบธาตุ Ca ซึ่งเป็นธาตุที่มีในอนอร์ไทต์และมีการกระจายตัวเล็กน้อย จาก Mapping รูปที่ 4.29 จึงสรุปได้ว่า ชิ้นงานกระเบื้องสูตร T60 มีการเกิดผลึกของอนอร์ไทต์ขึ้นเป็นจำนวนมาก ส่งผลให้กระเบื้องสูตร T60 นั้นมีการแอนตัวที่น้อยกว่าสูตร STD T20 และ T40



รูปที่ 4.28 ภาพกำลังขยาย 20,000 เท่า ของชิ้นงาน T60 และผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ

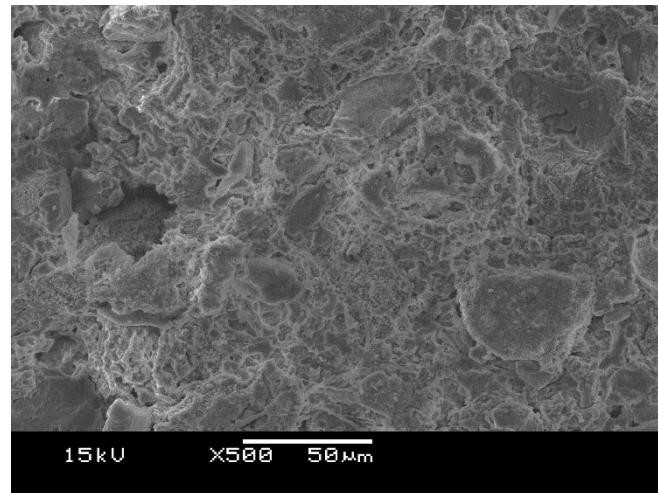


รูปที่ 4.29 ภาพกำลังขยาย 500 เท่า ของชิ้นงาน T60 และผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณแบบ Mapping

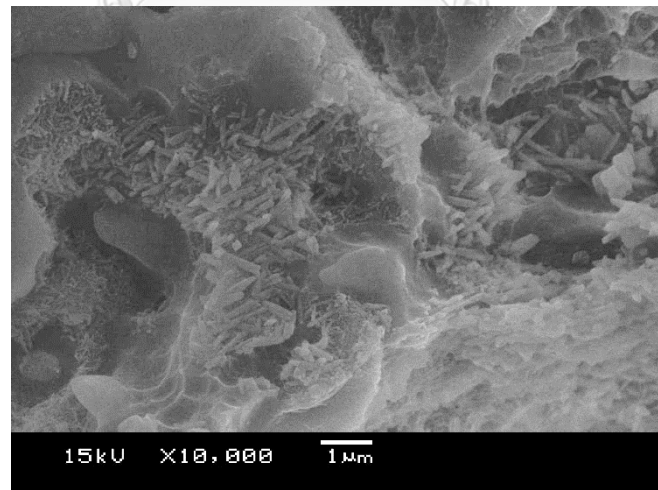
4.14.5 กระเบื้องที่มีเส้นใยคาร์บอนที่ผสม T3 อัตราส่วนร้อยละ 80

โครงสร้างจุลภาคของกระเบื้องดินเผาสูตร T80 ที่กำลังขยาย 500 เท่า รูปที่ 4.30 พบว่าพื้นผิวของชิ้นงานที่ผ่านการกัดกรด จะมีลักษณะโครงสร้างการจัดเรียงตัว คล้าย คอตซ์ และเนื้อแก้ว กระจายตัวอยู่ทั่วผิวชิ้นงาน และเมื่อขยายไปที่กำลังขยาย 10,00 เท่า รูปที่ 4.31 พบว่ามีลักษณะของผลึกรูปเข็มกระจายอยู่ทั่วชิ้นงาน โดยผลึกมีลักษณะผลึกที่มีขนาดเล็กกว่ากระจายตัวอยู่ ลักษณะของผลึกทรงคล้ายเข็ม ที่เกิดขึ้นมีขนาดความยาวประมาณ 0.1 - 1.5 ไมครอน โดยลักษณะของผลึกที่เกิดขึ้นกระจายตัวอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งมีความคล้ายคลึงกับมุลไลต์หรืออนอร์ไทต์และเมื่อใช้กำลังขยาย

ที่ 20,000 เท่า รูปที่ 4.32 จะสามารถเห็นหน้าตาของผลึกได้อย่างชัดเจนยิ่งขึ้นและมีขนาดใหญ่เล็กปนกันไปโดยผลึกขนาดใหญ่จะมีความกว้างของตัวผลึกที่กว้างกว่าคล้ายลักษณะเมล็ดข้าว เมื่อเทียบกับผลึกที่พบในกระเบื้องสูตร T20 T40 และ T60



รูปที่ 4.30 ภาพกำลังขยาย 500 เท่า ของชิ้นงาน T80

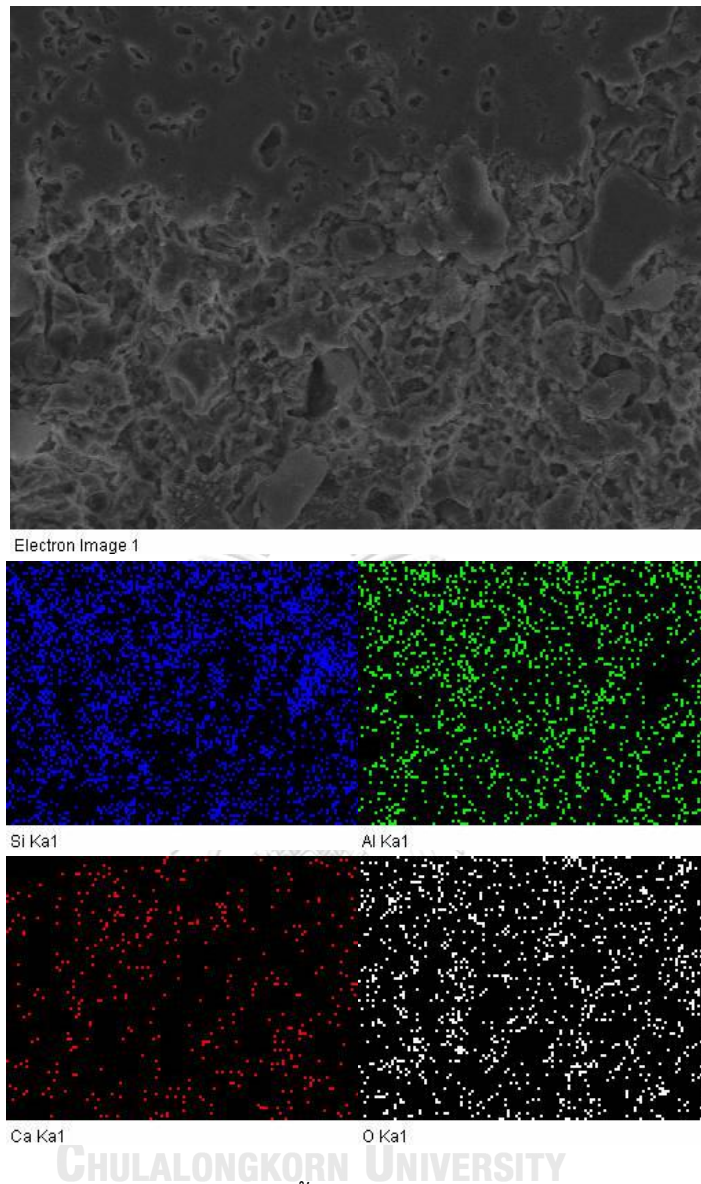


รูปที่ 4.31 ภาพกำลังขยาย 10,000 เท่า ของชิ้นงาน T80



รูปที่ 4.32 ภาพกำลังขยาย 20,000 เท่า ของชิ้นงาน T80

จากโครงสร้างจุลภาคของอนอร์ไทต์และมุลไลต์ที่คล้ายคลึงกัน จึงได้ใช้เทคนิคการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ (Energy Dispersive X-ray : EDS) รูปที่ 4.33 พบว่ามีการกระจายตัวของธาตุ Ca ซึ่งเป็นธาตุที่มีในอนอร์ไทต์กระจายตัวอยู่ทั่วชิ้นงาน เมื่อเทียบกับการกระจายตัวใน T20 T40 และ T60 กระเบื้องดินเผา T80 นั้นมีการกระจายตัวของ Ca ที่มากขึ้น ส่งผลให้ ผลึกอนอร์ไทต์นั้นมากขึ้นตาม

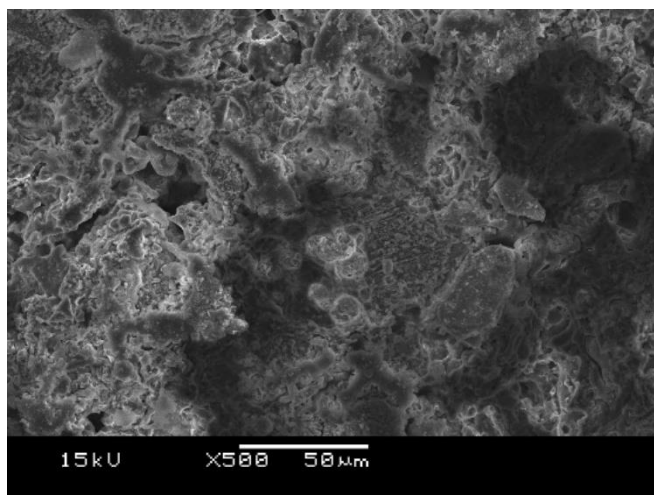


รูปที่ 4.33 ภาพกำลังขยาย 500 เท่า ของชิ้นงาน T80 และผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณแบบ Mapping

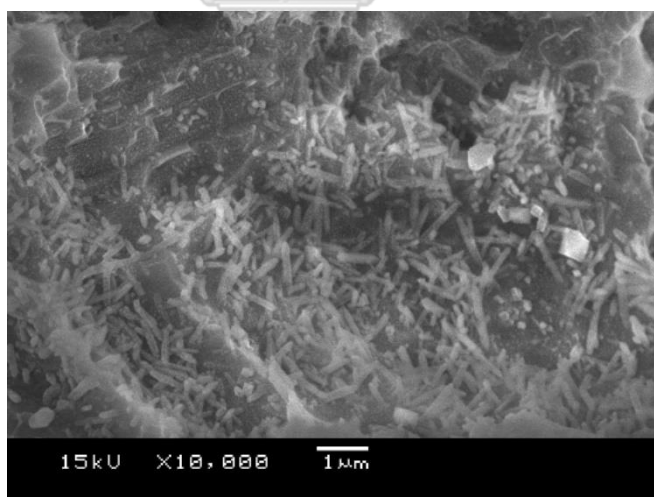
4.14.6 กระเบื้องที่มีเส้นใยคาร์บอนผสมสูตร T3

โครงสร้างจุลภาคของกระเบื้องดินเผาสูตร T3 ที่กำลังขยาย 500 เท่า รูปที่ 4.34 พบว่าพื้นผิวของชิ้นงานที่ผ่านการกัดกรวด จะมีลักษณะโครงสร้างการจัดเรียงตัว คล้าย คอวตซ์ และเนื้อแก้ว กระจายตัวอยู่ทั่วผิวชิ้นงาน และเมื่อขยายไปที่กำลังขยาย 10,00 เท่า รูปที่ 4.35 พบว่ามีลักษณะของผลึกรูปเข็มกระจายอยู่ทั่วชิ้นงาน โดยจะไม่ค่อยพบลักษณะผลึกที่มีขนาดเล็ก ลักษณะของผลึกทรงคล้ายเข็ม ที่เกิดขึ้นมีขนาดความยาวประมาณ 0.5 - 1.75 ไมครอน โดยจะมีการกระจายตัวอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งมีความคล้ายคลึงกับอนอร์ไทต์และเมื่อใช้กำลังขยายที่ 20,000 เท่า รูปที่ 4.36 จะพบผลึกได้

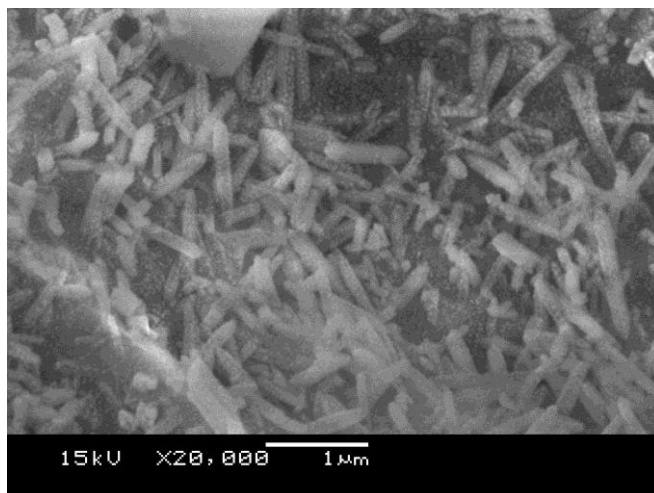
อย่างชัดเจนยิ่งขึ้น มีขนาดใหญ่ และพบผลึกมากขึ้น เมื่อเทียบกับกระเบื้องสูตร T20 T40 T60 และ T80



รูปที่ 4.34 ภาพกำลังขยาย 500 เท่า ของชิ้นงาน T3

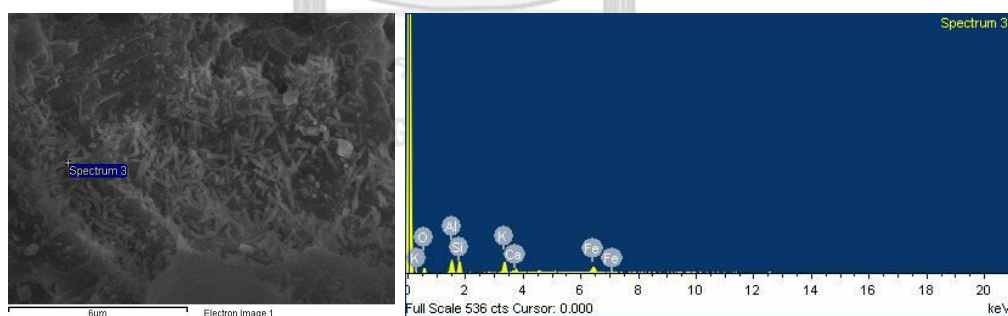


รูปที่ 4.35 ภาพกำลังขยาย 10,000 เท่า ของชิ้นงาน T3

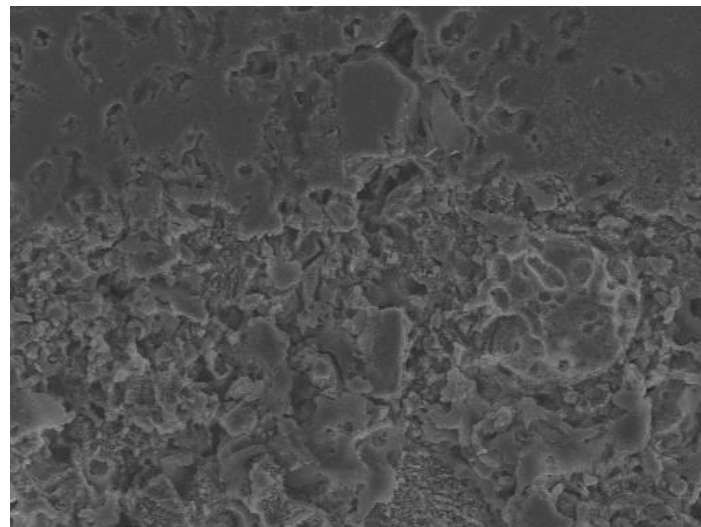


รูปที่ 4.36 ภาพกำลังขยาย 20,000 เท่า ของชิ้นงาน T3

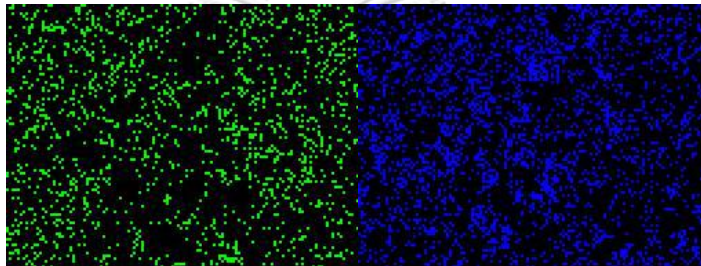
จากโครงสร้างจุลภาคของอนอร์ไทต์และมุลไลต์ที่คล้ายคลึงกัน จึงได้ใช้เทคนิคการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณเชิงคุณภาพ (Energy Dispersive X-ray : EDS) รูปที่ 4.37 พบว่าแท่งผลึกที่มีความยาวขนาด 0.5 - 1.75 ไมครอน นั้นมีพบธาตุ Ca ซึ่งเป็นธาตุที่มีในอนอร์ไทต์และมีการกระจายตัวเล็กน้อย จาก Mapping รูปที่ 4.38 จึงสรุปได้ว่า ชิ้นงานกระเบื้องสูตร T3 จะมีการเกิดผลึกของอนอร์ไทต์ขึ้นเป็นจำนวนมาก ส่งผลให้กระเบื้องสูตร T3 นั้นมีการแอนตัวที่น้อยที่สุดในการทดลอง



รูปที่ 4.37 ภาพกำลังขยาย 20,000 เท่า ของชิ้นงาน T3 และผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ

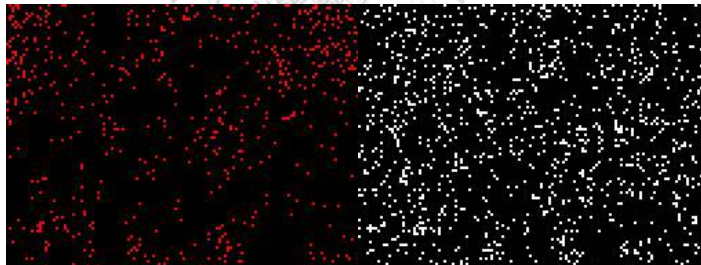


Electron Image 1



Al Ka1

Si Ka1



Ca Ka1

O Ka1

CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 4.38 ภาพกำลังขยาย 500 เท่า ของชิ้นงาน T3 และผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณแบบ Mapping

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการวิจัยพบว่า กระเบื้องที่มีส่วนผสมของเถ้าหนักลิทไนต์นั้นจะมีสมบัติในการลดการแอ่นตัวที่อุณหภูมิสูงขณะเผา เนื่องจากเถ้าหนักลิทไนต์นั้นเป็นวัสดุที่มีแคลเซียมออกไซด์ในปริมาณสูง ช่วยก่อให้เกิดเฟสออร์โทไคต์ขึ้นในชิ้นงานได้ ดังนั้นการเพิ่มปริมาณเถ้าหนักลงในสูตรกระเบื้องสโตนแวร์มาตรฐาน จึงช่วยให้กระเบื้องนั้นมีรูปทรงที่ดีขึ้นเพราะมีการแอ่นตัวลดลง แต่ในทางกลับกัน การที่เติมเถ้าหนักลงไปมากนั้นจะส่งผลทำให้ กระเบื้องนั้นเกิดการพรุณตัวขึ้น จึงควรเลือกสูตรให้เหมาะสมกับการผลิตเพื่อนำไปใช้งาน

5.1.1 กระเบื้องที่มีการแอ่นตัวน้อยที่สุดคือสูตรผสม T03 (ที่ประกอบด้วยเถ้าหนักลิทไนต์ ร้อยละ 15 ดินดำแม่ทานร้อยละ 30 ดินขาวลำปางร้อยละ 24 หินผุร้อยละ 21 หินฟันม้าโซเดียมร้อยละ 5 และทรายบดร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก) มีค่าการแอ่นตัวที่ 1.29×10^{-6} ต่อมิลลิเมตร และปริมาณการดูดซึมน้ำที่ 0.99 เปอร์เซ็นต์

5.1.2 ความสามารถในการขึ้นรูปกระเบื้องที่มีอัตราส่วนของเถ้าหนักลิทไนต์ผสมในอัตราส่วนที่เหมาะสมจะช่วยให้กระเบื้องนั้นมีความหนาแน่นก่อนเผาที่ดี และมีการดูดซึมน้ำต่ำ

5.1.3 การเพิ่มปริมาณของเถ้าหนักทำให้เกิดผลึกออร์โทไคต์มากขึ้น ส่งผลให้ชิ้นงานมีการแอ่นตัวที่น้อยลงตาม

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ทดลองปรับเพิ่มสูตรเพื่อให้ได้ผลที่หลากหลายขึ้น โดยการปรับเพิ่มและลดปริมาณเถ้าหนักลิทไนต์

5.2.2 ทดลองใช้วิธีการอื่นในการเตรียม และ ขึ้นรูปชิ้นงาน เช่น การบดผสมแบบเปียก การบดผสมแบบแห้งด้วยเครื่อง Vibratory mill

5.2.3 ทดลองขึ้นรูปกระเบื้องจริง เพื่อวิเคราะห์ความเป็นไปได้ในการนำไปใช้ในเชิงอุตสาหกรรม

5.2.4 ทำการวิเคราะห์ปริมาณเฟสออร์โทไคต์และเฟสอื่นๆ รวมทั้งเฟสแก้วในเชิงปริมาณ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างเฟสต่างๆ กับการแอ่นตัวของชิ้นงาน

บรรณานุกรม

1. กรมทรัพยากรธรณี. 2546. การพัฒนาการใช้ประโยชน์เถ้าลอยลิกไนต์ในประเทศไทย. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย
2. Selli, N.T. 2015. Development of anorthite based white porcelain stoneware tile compositions. Ceramics International 41: 7790-7795.
3. บุญญวัฒน์ ชุนอินทร์, สถานการณ์อุตสาหกรรมเหมืองแร่ของไทยปี 2555 และแนวโน้มปี 2556, สำนักบริหารยุทธศาสตร์, Editor 2555.
4. สันทัด ศิริอนันต์ไพบูลย์, ญัฐธนิชา ตระการจินตานนท์, and เปี่ยมศักดิ์ เมนะเศวต. 2012. ถ่านหินกับการผลิตไฟฟ้าในประเทศไทย. The Journal of the Royal Institute of Thailand Vol. 37 No. 4:
5. ปรีดา พิมพ์ขาวขำ. 2547. เซรามิกส์. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
6. สถาบันพัฒนาวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อม, ภาพรวมอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์แก้วของประเทศไทย, 2548: สถาบันพัฒนาวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อม.
7. ไพจิตร อังศิริวัฒน์. 2541. เนื้อดินเซรามิก พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์:
8. ปุณณรัตน์ พิชญไพบูลย์. 2538. เครื่องเคลือบดินเผา : เทคนิคและวิธีการสร้างสรรค์. สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
9. *ISO 13006 Ceramic Tiles—Definitions, Classification, Characteristics and Marking*, 1998, International Organization for Standardization.
10. Bernardin, A.M., D.S. de Medeiros, and H.G. Riella. 2006. Pyroplasticity in porcelain tiles. Materials Science and Engineering: A 427: 316-319.
11. Chen, Y., et al. 2013. Preparation and characterization of red porcelain tiles with hematite tailings. Construction and Building Materials 38: 1083-1088.
12. Güngör, F. 2018. Investigation of pyroplastic deformation of whitewares: Effect of crystal phases in the “CaO” based glassy matrix. Ceramics International 44: 13360-13366.
13. Turkmen, O., A. Kucuk, and S. Akpınar. 2015. Effect of wollastonite addition on sintering of hard porcelain. Ceramics International 41: 5505-5512.
14. Olhero, S.M., G. Tari, and J.M.F. Ferreira. 2001. Feedstock Formulations for Direct Consolidation of Porcelains with Polysaccharides. Journal of the American Ceramic Society 84: 719-725.
15. Melchiades, F.G., et al. 2014. AN INSIGHT INTO THE PYROPLASTICITY OF PORCELAIN STONEWARE TILES. QUALICER 2014

16. Rambaldi, E., et al. 2007. Using waste glass as a partial flux substitution and pyroplastic deformation of a porcelain stoneware tile body. Ceramics International 33: 727-733.
17. Aydin, T. and A. Kara. 2014. Effect of spodumene addition on pyroplastic deformation of porcelain stoneware. Journal of Ceramic Processing Research 15: 486-491.
18. Tunçel, D.Y. and E. Özel. 2012. Evaluation of pyroplastic deformation in sanitaryware porcelain bodies. Ceramics International 38: 1399-1407.
19. Suvaci, E. and N. Tamsu. 2010. The role of viscosity on microstructure development and stain resistance in porcelain stoneware tiles. Journal of the European Ceramic Society 30: 3071-3077.
20. Conserva, L.R.d.S., et al. 2017. Pyroplastic deformation of porcelain stoneware tiles: Wet vs. dry processing. Journal of the European Ceramic Society 37: 333-342.
21. Wu, X., et al. 2017. Preparation and characterization of ceramic proppants with low density and high strength using fly ash. Journal of Alloys and Compounds 702: 442-448.
22. Andrews, A.I. 1957. Ceramic Test and Calculation. America : Braunworth & Co. IND.Book Manufactures.
23. Rhodes, D. 1974. Clay and Glazes for the potter. New York : Chilton Book.
24. *ISO 10545-4 International Standard for Ceramic tiles—Part 4*, 2000, International Organization for Standardization.
25. Sánchez, E., et al. 2019. Revisiting pyroplastic deformation. Application for porcelain stoneware tile bodies. Journal of the European Ceramic Society 39: 601-609.
26. Panich, J., C. Auechalitanukul, and R. McCuiston. 2018. Effects of lignite bottom ash content and particle size on the properties of a bronze-based friction material. Materials Today: Proceedings 5: 9290-9297.
27. Ghasemi-Kahrizsangi, S., et al. 2016. Densification and Properties of Fe₂O₃ Nanoparticles added CaO Refractories. Ceramics International 42: 12270-12275.
28. Barreiro, J.G., et al. 2007. Preferred orientation of anorthite deformed experimentally in Newtonian creep. Earth and Planetary Science Letters 264: 188-207.
29. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาปูพื้น มอก. 37-2529, 2529, กระทรวง

อุตสาหกรรม.

30. Das, S.K. and K. Dana. 2003. Differences in densification behaviour of K- and Na-feldspar-containing porcelain bodies. Thermochimica Acta 406: 199-206.
31. Li, B., W. Li, and J. Zheng. 2017. Effect of SiO₂ content on the sintering kinetics, microstructures and properties of BaO-Al₂O₃-B₂O₃-SiO₂ glass-ceramics for LTCC application. Journal of Alloys and Compounds 725: 1091-1097.
32. Gültekin, E.E., G. Topateş, and S. Kurama. 2017. The effects of sintering temperature on phase and pore evolution in porcelain tiles. Ceramics International 43: 11511-11515.
33. Recarey, C., et al. 2018. Advances in particle packing algorithms for generating the medium in the Discrete Element Method. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering
34. Rungchet, A., et al. 2017. Synthesis of low-temperature calcium sulfoaluminate-belite cements from industrial wastes and their hydration: Comparative studies between lignite fly ash and bottom ash. Cement and Concrete Composites 83: 10-19.
35. Li, C., et al. 2016. Mullite whisker reinforced porous anorthite ceramics with low thermal conductivity and high strength. Journal of the European Ceramic Society 36: 761-765.
36. Perná, I., M. Šupová, and T. Hanzlíček. 2018. Gehlenite and anorthite formation from fluid fly ash. Journal of Molecular Structure 1157: 476-481.
37. Naga, S.M., et al. 2017. Fabrication and properties of cordierite / anorthite composites. Ceramics International 43: 6024-6028.
38. Gajek, M., et al. 2017. Development of anorthite based white porcelain glaze without ZrSiO₄ content. Ceramics International 43: 1703-1709.
39. Qin, J., et al. 2015. Recycling of lime mud and fly ash for fabrication of anorthite ceramic at low sintering temperature. Ceramics International 41: 5648-5655.
40. Magagnin, D., et al. 2014. Effect of kaolinite, illite and talc on the processing properties and mullite content of porcelain stoneware tiles. Materials Science and Engineering A 618: 533-539.
41. Tucci, A., et al. 2004. Use of soda-lime scrap-glass as a fluxing agent in a porcelain stoneware tile mix. Journal of the European Ceramic Society 24: 83-92.

42. Ge, Z., et al. 2018. Effect of CaO/Na₂O on slag viscosity behavior under entrained flow gasification conditions. Fuel Processing Technology 181: 352-360.
43. Capoglu, A. and P.F. Messer. 2004. Design and development of a chamotte for use in a low-clay translucent whiteware. Journal of the European Ceramic Society 24: 2067-2072.
44. Capoglu, A. 2011. A novel low-clay translucent whiteware based on anorthite. Journal of the European Ceramic Society 31: 321-329.
45. Ke, S., et al. 2013. Dolomite, wollastonite and calcite as different CaO sources in anorthite-based porcelain. Ceramics International 39: 4953-4960.





ตารางที่ ก1 ผลการวัดค่าสมบัติต่าง ๆ ของ STD

Type	Number	Water Absorption (%)	PI (10^{-6}cm^{-1})	%Weight lost	%Shrinkage	Green Density (g/cm^3)	True density (g/cm^3)	Bulk density (g/cm^3)	Porosity	Porosity x PI (10^{-6}cm^{-1})
STD.	1T	2.43	3.79	5.94%	4.90%	2.12	2.52	2.37	5.75	21.78
	1B	5.21		6.17%	3.73%	1.84	2.53	2.23	11.63	
	2T	3.87	2.95	5.37%	4.46%	1.95	2.50	2.28	8.82	26.05
	2B	4.62		5.64%	4.40%	1.87	2.52	2.26	10.43	
	3T	2.36	4.12	5.77%	4.89%	2.06	2.59	2.44	5.75	23.70
	3B	5.46		5.98%	3.72%	1.80	2.61	2.29	12.48	
	4T	3.95	2.68	5.56%	4.47%	2.00	2.41	2.20	8.69	23.31
	4B	4.80		5.85%	4.41%	1.92	2.42	2.17	10.43	
	AVG	3.15	3.39	5.66%	4.06%	2.03	2.50	2.32	7.25	23.71
	SD	0.88	6.78	0.25%	0.39%	0.08	0.08	0.11	1.73	0.00001767

ตารางที่ ก2 ผลการวัดค่าสมบัติต่าง ๆ ของ T10

Type	Number	Water Absorption (%)	PI (10^{-6}cm^{-1})	%Weight lost	%Shrinkage	Green Density (g/cm^3)	True density (g/cm^3)	Bulk density (g/cm^3)	Porosity	Porosity x PI (10^{-6}cm^{-1})
T10	1T	1.08	3.62	5.85%	5.70%	2.13	2.50	2.43	2.63	9.52
	1B	1.96		5.80%	5.89%	2.02	2.87	2.72	5.34	
	2T	1.42	3.17	5.87%	5.77%	2.08	2.44	2.36	3.34	10.59
	2B	1.12		5.79%	5.82%	2.09	2.86	2.77	3.10	
	3T	1.05	3.98	5.67%	5.69%	2.07	2.58	2.52	2.63	10.47
	3B	2.33		5.62%	5.88%	1.97	2.97	2.78	6.48	
	4T	1.41	2.84	6.10%	5.78%	2.16	2.34	2.26	3.20	9.08
	4B	1.16		6.01%	5.83%	2.16	2.75	2.66	3.10	
	AVG	1.08	3.62	5.85%	5.70%	2.13	2.50	2.43	2.63	9.52
	SD	1.96	0.00	5.80%	5.89%	2.02	2.87	2.72	5.34	

ตารางที่ ก3 ผลการวัดค่าสมบัติต่าง ๆ ของ T20

Type	Number	Water Absorption (%)	PI (10^{-6}cm^{-1})	%Weight lost	%Shrinkage	Green Density (g/cm^3)	True density (g/cm^3)	Bulk density (g/cm^3)	Porosity	Porosity x PI (10^{-6}cm^{-1})
T20	1T	1.14	3.66	5.65	5.67	2.13	2.50	2.43	2.77	10.12
	1B	1.10		5.94	5.63	2.20	2.62	2.54	2.80	
	2T	0.59	3.34	5.56	5.66	2.17	2.52	2.48	1.46	4.87
	2B	0.56		6.02	5.71	2.19	2.58	2.55	1.42	
	3T	1.10	4.05	5.46	5.66	2.07	2.58	2.51	2.77	11.19
	3B	1.49		5.76	5.62	2.14	2.71	2.60	3.87	
	4T	0.55	2.96	5.78	5.67	2.25	2.41	2.38	1.31	3.88
	4B	0.58		6.25	5.72	2.27	2.48	2.45	1.42	
	AVG	0.85	3.50	5.61	5.67	2.16	2.50	2.45	2.08	7.52
	SD	0.32	3.54	0.13	0.06	0.08	0.07	0.06	0.80	0.70

ตารางที่ ก4 ผลการวัดค่าสมบัติต่าง ๆ ของ T30

Type	Number	Water Absorption (%)	PI (10^{-6}cm^{-1})	%Weight lost	%Shrinkage	Green Density (g/cm^3)	True density (g/cm^3)	Bulk density (g/cm^3)	Porosity	Porosity x PI (10^{-6}cm^{-1})
T30	1T	0.55	2.75	5.70	5.39	2.11	2.48	2.45	1.35	3.70
	1B	0.57		5.68	5.56	2.10	2.50	2.46	1.41	
	2T	1.44	3.49	5.71	5.56	2.24	2.49	2.40	3.46	12.06
	2B	1.38		5.73	5.70	2.12	2.51	2.43	3.35	
	3T	0.53	3.02	5.52	5.38	2.05	2.57	2.53	1.35	4.06
	3B	1.00		5.49	5.55	2.04	2.59	2.52	2.51	
	4T	1.44	3.09	5.93	5.57	2.33	2.38	2.30	3.32	10.24
	4B	1.44		5.95	5.71	2.19	2.41	2.33	3.35	
	AVG	0.99	3.09	5.72	5.63	2.18	2.48	2.42	2.37	7.52
	SD	0.52	0.30	0.16	0.09	0.04	0.08	0.10	1.18	1.28

ตารางที่ ก5 ผลการวัดค่าสมบัติต่าง ๆ ของ T40

Type	Number	Water Absorption (%)	PI (10^{-6}cm^{-1})	%Weight lost	%Shrinkage	Green Density (g/cm^3)	True density (g/cm^3)	Bulk density (g/cm^3)	Porosity	Poro x PI (10^{-6}cm^{-1})
T40	1T	2.21	3.32	5.24	5.69	2.26	2.48	2.35	5.20	17.25
	1B	1.71		5.39	5.74	2.28	2.49	2.39	4.08	
	2T	1.39	2.42	5.50	5.59	2.19	2.49	2.41	3.34	8.07
	2B	2.20		5.71	5.50	2.17	2.48	2.35	5.17	
	3T	2.14	3.68	5.07	5.68	2.18	2.57	2.43	5.20	19.12
	3B	2.09		5.22	5.73	2.21	2.58	2.45	5.12	
	4T	1.38	2.15	5.71	5.60	2.27	2.39	2.32	3.20	6.89
	4B	2.29		5.93	5.51	2.25	2.38	2.26	5.17	
	AVG	1.78	2.89	5.38	5.62	2.22	2.48	2.38	4.23	12.83
	SD	0.46	0.18	0.28	0.13	0.04	0.07	0.05	1.11	1.32

ตารางที่ ก6 ผลการวัดค่าสมบัติต่าง ๆ ของ T50

Type	Number	Water Absorption (%)	PI (10^{-6}cm^{-1})	%Weight lost	%Shrinkage	Green Density (g/cm^3)	True density (g/cm^3)	Bulk density (g/cm^3)	Porosity	Porosity (10^{-6}cm^{-1})
T50	1T	2.56	2.87	5.63	5.30	2.22	2.58	2.42	6.19	17.78
	1B	2.24		5.80	4.81	2.25	2.53	2.40	5.37	
	2T	2.02	2.39	5.71	5.01	2.21	2.55	2.42	4.88	11.66
	2B	3.13		5.65	4.99	2.21	2.53	2.34	7.33	
	3T	2.47	3.19	5.45	5.29	2.15	2.67	2.51	6.19	19.73
	3B	2.60		5.62	4.81	2.18	2.62	2.45	6.38	
	4T	2.04	2.12	5.93	5.02	2.29	2.44	2.32	4.74	10.02
	4B	3.26		5.87	5.00	2.30	2.42	2.25	7.33	
	AVG	2.27	2.64	5.68	4.90	2.22	2.56	2.42	5.50	14.80
	SD	0.28	0.38	0.20	0.10	0.06	0.10	0.08	0.80	1.38

ตารางที่ ก7 ผลการวัดค่าสมบัติต่าง ๆ ของ T60

Type	Number	Water Absorption (%)	PI (10^6cm^{-1})	%Weight lost	%Shrinkage	Green Density (g/cm^3)	True density (g/cm^3)	Bulk density (g/cm^3)	Porosity	Porosity (10^6cm^{-1})
T60	1T	4.27	3.42	5.65	4.16	2.18	2.56	2.31	9.86	33.72
	1B	5.49		5.72	3.96	2.14	2.54	2.23	12.26	
	2T	2.01	1.97	5.69	4.06	2.23	2.57	2.45	4.92	9.68
	2B	2.79		5.53	4.29	2.21	2.49	2.33	6.50	
	3T	4.13	3.79	5.46	4.15	2.11	2.65	2.39	9.86	37.35
	3B	5.75		5.54	3.95	2.08	2.63	2.29	13.15	
	4T	2.03	1.74	5.92	4.07	2.31	2.47	2.35	4.78	8.32
	4B	2.90		5.74	4.29	2.29	2.40	2.24	6.50	
	AVG	3.11	2.73	5.68	4.12	2.21	2.56	2.37	7.36	22.27
	SD	0.48	0.26	0.18	0.19	0.09	0.08	0.06	2.89	0.96

ตารางที่ ก8 ผลการวัดค่าสมบัติต่าง ๆ ของ T70

Type	Number	Water Absorption (%)	PI (10^{-6}cm^{-1})	%Weight lost	%Shrinkage	Green Density (g/cm^3)	True density (g/cm^3)	Bulk density (g/cm^3)	Porosity	Porosity (10^{-6}cm^{-1})
T70	1T	3.16	1.58	5.69	2.14	2.13	2.53	2.34	7.39	11.71
	1B	4.34		5.98	2.89	2.15	2.56	2.31	9.99	
	2T	5.63	3.16	5.84	2.54	2.14	2.57	2.24	12.63	39.92
	2B	5.07		5.84	2.90	2.15	2.57	2.27	11.52	
	3T	3.05	1.76	5.51	2.14	2.07	2.62	2.42	7.39	12.97
	3B	4.63		5.78	2.88	2.09	2.65	2.36	10.94	
	4T	5.80	2.82	6.06	2.55	2.22	2.46	2.15	12.48	35.17
	4B	5.28		6.06	2.91	2.23	2.47	2.18	11.52	
	AVG	4.41	2.33	5.77	2.89	2.14	2.54	2.29	9.97	24.94
	SD	0.33	0.24	0.23	0.01	0.06	0.07	0.12	2.98	0.89

ตารางที่ ก9 ผลการวัดค่าสมบัติต่าง ๆ ของ T80

Type	Number	Water Absorption (%)	PI (10^{-6}cm^{-1})	%Weight lost	%Shrinkage	Green Density (g/cm^3)	True density (g/cm^3)	Bulk density (g/cm^3)	Porosity	Porosity x PI (10^{-6}cm^{-1})
T80	1T	4.95	1.51E-06	5.94	2.49	2.06	2.55	2.26	11.19	16.83
	1B	5.56		6.04	2.66	2.07	2.54	2.23	12.36	
	2T	4.49	2.79	5.57	2.60	2.08	2.50	2.25	10.10	28.16
	2B	5.07		5.33	2.71	2.11	2.51	2.23	11.31	
	3T	4.78	1.65	5.76	2.48	2.00	2.63	2.34	11.19	18.49
	3B	5.81		5.85	2.65	2.01	2.63	2.28	13.26	
	4T	4.62	2.50	5.79	2.61	2.15	2.40	2.16	9.96	24.86
	4B	5.28		5.54	2.72	2.18	2.42	2.14	11.31	
	AVG	4.71	2.11	5.76	2.69	2.07	2.52	2.25	10.61	22.09
	SD	0.20	0.10	0.15	0.04	0.06	0.10	0.07	0.67	2.33

ตารางที่ 10 ผลการวัดค่าสมบัติต่าง ๆ ของ T90

Type	Number	Water Absorption (%)	PI (10^{-6}cm^{-1})	%Weight lost	%Shrinkage	Green Density (g/cm^3)	True density (g/cm^3)	Bulk density (g/cm^3)	Porosity	Porosity x PI (10^{-6}cm^{-1})
T90	1T	5.68	1.15	5.88	2.71	1.90	2.58	2.25	12.78	14.73
	1B	5.71		5.41	2.77	1.90	2.56	2.24	12.78	
	2T	2.82	1.20	5.85	2.76	2.06	2.58	2.40	6.79	8.12
	2B	4.32		5.96	2.87	2.09	2.66	2.38	10.31	
	3T	5.49	1.26	5.69	2.71	1.86	2.67	2.33	12.78	16.14
	3B	5.96		5.23	2.77	1.86	2.65	2.29	13.66	
	4T	2.88	1.07	6.08	2.76	2.13	2.47	2.31	6.64	7.07
	4B	4.50		6.20	2.88	2.17	2.55	2.29	10.31	
	AVG	4.22	1.17	5.88	2.82	1.99	2.57	2.32	9.75	11.52
	SD	0.19	0.83	0.15	0.06	0.09	0.08	0.06	3.50	0.99

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายธฤต ประสาทเสรี
วัน เดือน ปี เกิด	05 กุมภาพันธ์ 2534
สถานที่เกิด	กรุงเทพฯ
วุฒิการศึกษา	ปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ
ที่อยู่ปัจจุบัน	138/55 ถ.พหลโยธิน ต.สวนดอก อ.เมือง ลำปาง
ผลงานตีพิมพ์	Publication Title: International Conference on Traditional and Advanced Ceramics 2017 Article Title: Tarit Prasartseeree, Thanakorn Wasanapiarnpong, Charusporn Mongkolkachit, Noppasint Jiraborvornpongsa, Influence of Lignite Bottom Ash on Pyroplastic Deformation of Stoneware Ceramic Tiles, Key Engineering Materials, Vol. 766, pp. 264-269 (2018).