



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการการพัฒนาสูตรเนื้อกระเบื้องดินเผาungหลังคาดูดซึมน้ำต่ำ
โดยใช้เนื้อดินผสมเนื้อดินแดงท้องถิ่น

Development of low water absorption clay roof tile
from the local red clay based mixtures

โดย ดร.สิริพรรณ นิลโพธิ์ และคณะ

สิงหาคม 2561

สัญญาเลขที่ RDG60T0066

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการการพัฒนาสูตรเนื้อกระเบื้องดินเผาungหลังคาดูดซึมน้ำต่ำ
โดยใช้เนื้อดินผสมเนื้อดินแดงท้องถิ่น

Development of low water absorption clay roof tile
from the local red clay based mixtures

คณะผู้วิจัย		สังกัด
1.	ดร.สิริพรรณ นิลไพรัช	สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
2.	ดร.อภิรัฐ ชีรภาพิเศษพงษ์	คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ชุดโครงการ “การพัฒนาอุตสาหกรรมขนาดกลางและขนาดย่อม” ปีงบประมาณ 2560

สนับสนุนโดย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.)

และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

(ความเห็นในรายงานฉบับนี้เป็นของผู้วิจัย วช. - สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

บทสรุปผู้บริหาร

กระเบื้องดินเผาungหลังคาเป็นผลิตภัณฑ์ที่ยังคงได้รับความนิยมใช้งานตามอาคารบ้านเรือน วัด โรงแรม และแหล่งท่องเที่ยวทางวัฒนธรรม กระจายอยู่ทั่วทุกภูมิภาค อย่างไรก็ตามกระเบื้องดังกล่าวยังมีข้อด้อยบางประการ เช่น การเกิดคราบดำจากตะไคร่จากการดูดซึมน้ำสูง สีของผลิตภัณฑ์ไม่สม่ำเสมอ ความแข็งแรงต่ำ อีกทั้ง ในการขั้นตอนหลังเผาต้องรออุณหภูมิต่ำ (<200 องศาเซลเซียส) จึงเอากะเบื้องออกจากเตาโดยไม่เสียหาย ซึ่งทำให้เสียเวลาในการผลิต ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาสูตรเนื้อกระเบื้องดินเผาungหลังคาโดยใช้เนื้อผสมของดินแดงท้องถิ่น และเศษแก้ว พัฒนาคุณภาพกระเบื้องดินเผาungหลังคาที่มีค่าการดูดซึมน้ำต่ำกว่าร้อยละ 1 และลดการขยายตัวเนื่องจากความชื้นสูง ตลอดจนพัฒนาเนื้อกระเบื้องที่มีเฟสคริสโตบาลไลท์ต่ำเพื่อลดความเสียหายของผลิตภัณฑ์เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงวัฏภาคขณะลดอุณหภูมิเผา โดยการศึกษาประกอบด้วยการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของดินวัตถุดิบ ได้แก่ ดินเหนียวผักไห อ.ผักไห จ.พระนครศรีอยุธยา ดินเหนียวป่าโมก ต.ป่าโมก จ.อ่างทอง และดินเหนียวบ้านเบิก ต.บ้านเบิก จ.ลพบุรี ออกแบบสูตรเนื้อดินปั้นโดยผันแปรอัตราส่วน $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{SiO}_2$ ระหว่าง 0.253 - 0.388 และควบคุมปริมาณเศษแก้วในดินปั้นผสมปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก เตรียมตัวอย่างทดสอบด้วยวิธีรีดขึ้นรูปเป็นแท่งดินทรงกระบอก เพื่อทดสอบสมบัติทางกายภาพก่อนและหลังเผาที่อุณหภูมิ 1,100-1,150 องศาเซลเซียส ผลจากงานวิจัยนี้พบว่าสูตรกระเบื้องที่ใช้ดินเหนียวบ้านเบิก อ.ท่าเรือ จ.ลพบุรี เป็นวัตถุดิบหลัก และเศษแก้วเหลือทิ้งเป็นส่วนผสม ด้วยอัตราส่วนโดยน้ำหนัก $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.30 โดยประมาณ ทำให้ได้กระเบื้องที่เฟสผลึกมัลไลต์ที่เพิ่มความแข็งแรงให้แก่เนื้อกระเบื้อง และมีค่าการดูดซึมน้ำต่ำกว่าร้อยละ 1 หลังเผาที่ 1,150 องศาเซลเซียส ผลการวัดสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนพบว่าที่อุณหภูมิ ระหว่าง 50-200 องศาเซลเซียส ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนที่มักพบในเนื้อเซรามิกที่มีเฟสคริสโตบาลไลท์สูง สัมพันธ์กับผลการทดลองการทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลัน ด้วยการนำตัวอย่างออกจากเตาได้ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส พบว่าไม่เกิดการแตกร้าว เมื่อนำสูตรดินผสมนี้ไปขยายผลในโรงงานผลิตกระเบื้องดินเผา สามารถนำไปพัฒนาเป็นเนื้อผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปด้วย Ram Press ของโรงงานได้ภายหลังจากการปรับปรุงความเหนียวด้วยการใช้ดินดำแทนวัตถุดิบบางชนิดโดยยังคงองค์ประกอบเคมีในเนื้อดินผสมเท่าเดิม

งานวิจัยได้ถ่ายทอดเทคโนโลยีให้แก่บริษัท ซีวีบี เซรามิก จำกัด โดยนำสูตรเนื้อดินปั้นไปใช้ในการผลิตกระเบื้องดูดซึมน้ำต่ำที่ลดการสะสมของคราบสกปรกบนกระเบื้องจากตะไคร่น้ำซึ่งเป็นสาหร่ายที่อาศัยความชื้นบนกระเบื้องในการเติบโต และลดการแตกร้าวจากการขยายตัวของความชื้นในสภาพอากาศเย็นจัด นอกจากนี้ทางผู้ประกอบการดังกล่าวยังได้นำไปกระเบื้องดินเผาสูตรที่ได้จากงานวิจัยไปพัฒนาให้เป็นกระเบื้องเคลือบที่มีความสวยงามและมีสีสันหลากหลายเพื่อเพิ่มช่องทางในการจำหน่าย องค์ความรู้ในการพัฒนาเนื้อ

กระเบื้องดินเผาungหลังคาที่เกิดจากการใช้ดินแดงนี้ยังสามารถนำไปต่อยอดเป็นผลิตภัณฑ์ดูดซึมน้ำต่ำประเภทอื่น ๆ อาทิ ถ้วยชาม กระเบื้องปูพื้น ได้อีกด้วย ซึ่งจะช่วยลดการใช้ดินดำและดินขาวที่กำลังมีปัญหาดแคลนในประเทศ และทำช่วยเพิ่มมูลค่าของวัตถุดิบเนื้อดินแดงพื้นบ้านให้สามารถนำไปใช้ผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าสูงขึ้นได้อีกด้วย

บทคัดย่อ

กระเบื้องดินเผาungหลังคาเป็นผลิตภัณฑ์ที่ยังคงได้รับความนิยมใช้งานตามอาคารบ้านเรือน วัด โรงแรม และแหล่งท่องเที่ยวทางวัฒนธรรม กระจายอยู่ทั่วทุกภูมิภาค อย่างไรก็ตามกระเบื้องดังกล่าวยังมีข้อด้อยบางประการ เช่น การเกิดคราบดำจากตะไคร้จากการดูดซึมน้ำสูง สีของผลิตภัณฑ์ไม่สม่ำเสมอ ความแข็งแรงต่ำ อีกทั้งในการขั้นตอนหลังเผาต้องรออุณหภูมิต่ำ (< 200 องศาเซลเซียส) จึงเอากะเบื้องออกจากเตาโดยไม่เสียหาย ซึ่งทำให้เสียเวลาในการผลิต ในงานวิจัยนี้ได้พัฒนาสูตรกระเบื้องดินเผาungหลังคาดูดซึมน้ำต่ำ และมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นจากเดิม โดยทำการผสมดินแดงท้องถิ่นในพื้นที่จังหวัดพระนครศรีอยุธยา อ่างทอง และลพบุรี กับวัตถุดิบเซรามิกอื่น ๆ ได้แก่ ควอร์ต เฟลสปาร์ ดินขาว ดินดำ และเศษแก้ว โดยออกแบบให้ส่วนผสมดินมีองค์ประกอบเคมีโดยน้ำหนัก $\text{Al}_2\text{O}_3\text{:SiO}_2$ อยู่ในช่วง 0.28–0.30 ทำการศึกษาสมบัติก่อนเผาได้แก่ สมบัติการหดตัวเมื่อแห้ง ความแข็งแรงของชิ้นงานแห้งก่อนเผา และการศึกษาสมบัติของดินหลังเผาที่อุณหภูมิ 1100 และ 1150 องศาเซลเซียส ได้แก่ การหดตัวหลังเผา การดูดซึมน้ำ สีหลังเผา ความแข็งแรงต่อแรงดัด สมบัติการขยายตัวเนื่องจากความร้อนด้วยเทคนิคไดลาโตมิเตอร์ วิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ทำการทดสอบการทนต่อการเปลี่ยนแปลงความร้อนอย่างฉับพลัน ผลการวิจัยพบว่าสูตรกระเบื้องที่ใช้ดินเหนียวบ้านเบิก อ.ท่าม่วง จ.ลพบุรี เป็นวัตถุดิบหลัก และเศษแก้วเหลือทิ้งเป็นส่วนผสม ด้วยอัตราส่วนโดยน้ำหนัก $\text{Al}_2\text{O}_3\text{:SiO}_2$ เท่ากับ 0.30 โดยประมาณ ภายหลังการเผาที่อุณหภูมิ 1,150 องศาเซลเซียส ทำให้ได้เนื้อกระเบื้องที่มีค่าความแข็งแรงสูงกว่ามาตรฐานกระเบื้องดินเผาungหลังคา มอก 158-2518 ถึง 7 เท่า จากการเกิดเฟสมัลไลต์ในเนื้อกระเบื้องและมีสมบัติการดูดซึมน้ำต่ำกว่าร้อยละ 1 ผลการวัดสมบัติการขยายตัวทางความร้อนพบว่าที่อุณหภูมิ ระหว่าง 50-200 องศาเซลเซียส ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของค่าสมบัติการขยายตัวเนื่องจากความร้อน สัมพันธ์กับผลการทดสอบการทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลัน ด้วยการนำตัวอย่างออกจากเตาได้ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส โดยไม่เกิดการแตกร้าว เมื่อนำสูตรดินผสมไปขยายผลในโรงงานผลิตกระเบื้องดินเผา พบว่าสามารถนำไปพัฒนาเป็นเนื้อผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปด้วย Ram Press ของโรงงานได้ภายหลังจากการปรับปรุงความเหนียวด้วยการใช้ดินดำแทนวัตถุดิบบางชนิดโดยยังคงองค์ประกอบเคมีในเนื้อดินผสมเท่าเดิม

คำสำคัญ : วัสดุก่อสร้าง กระเบื้องungหลังคาดินเผา ดินแดงท้องถิ่น เศษแก้ว การดูดซึมน้ำต่ำ

Abstract

A clay roof tile is a product which has been used for construction such as houses, temples, hotels as well as other cultural tourist attractions located around country. However, there are some disadvantages of installing the clay roof tile such as the high moisture adsorption, which leads to the growth algae causing black stain on tile. After firing process, waiting for the temperature in a furnace decreasing lower than 200 °C before taking the fired products out is necessary to prevent the damage, result in long time consuming. Moreover, the non-uniform in color and low strength of products may be counted as their drawback. In this study, we focus on developing the clay roof tiles with low moisture adsorption and high mechanical strength. The local pottery red clay from Phra Nakhon Si Ayutthaya, Angthong and Lopburi province were mixed with other ceramic raw materials such as quartz, feldspar, kaolin, ball clay and fine sodalime glass cullet to be a ceramic roof tile body. The mixtures were designed by varied $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{SiO}_2$ weight ratios between 0.28-0.30. The properties of green body, which as dried shrinkage and flexural strength, were measured. The samples were fired at 1100 and 1150 °C and then the physical and thermal properties such as firing shrinkage, water absorption, color, flexural strength, coefficient of thermal expansion, mineralogy and thermal resistance were measured and analysed. The results found that using of Banberg clay from Lopburi province as a raw material, incorporating with cullet with an $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{SiO}_2$ weight ratio of 0.30, led to the reduction in moisture adsorption more than 1%, after firing at 1,150 °C. Its strength was 7 times higher than the minimum strength requirement according to TIS 158-2518, because of cristalization of mullite phase. Moreover, the fired tile can be taken out of the furnace at 200 °C without cracking and maintains the strength according to TIS 158-2518. This result was supported by dilatometric measurement, the thermal expansion curve was constant slope between 50 and 200 °C. In addition, the developed clay roof tile formula could be produced by the industrial scale Ram Press.

Keywords : Construction materials, Clay roof tile, Local pottery red clay, Cullet, Low water absorption

สารบัญ

หัวข้อ		หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย		ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ		ข
สารบัญ		ค
สารบัญตาราง		จ
สารบัญภาพ		ช
บทที่ 1	บทนำ	1
1.1	ความสำคัญ และที่มาของปัญหา	2
1.2	วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
1.3	ขอบเขตของการวิจัย	4
1.4	ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการ	4
1.5	กรอบแนวความคิดของการวิจัยและขั้นตอนการวิจัย	4
1.6	การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศที่เกี่ยวข้อง	8
1.7	วิธีการดำเนินการวิจัย	22
1.8	แผนงานโครงการ	29
บทที่ 2	ผลการดำเนินงานวิจัย	30
2.1	การศึกษาและวิเคราะห์สมบัติของวัตถุดิบจากแหล่งที่เลือก	31
2.1.1	ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี	31
2.1.2	ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่วิทยา	32
2.1.3	ผลการวิเคราะห์ปริมาณกากค้ำตะแกรงและขนาดอนุภาค	33
2.1.4	ผลการทดสอบเกลือซัลเฟตละลายน้ำ	34
2.2	การพัฒนาสูตรเนื้อดินปั้น	34
2.2.1	การศึกษาสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมจากสูตรเนื้อดินปั้นโดยใช้ดินเหนียวป่าโมกเป็นวัตถุดิบหลัก	34
2.2.2	การศึกษาสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมจากสูตรเนื้อดินปั้นโดยใช้ดินเหนียวผักไถ้เป็นวัตถุดิบหลัก	38
2.2.3	การศึกษาสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมจากสูตรเนื้อดินปั้นโดยใช้ดินเหนียวบ้านเบิกเป็นวัตถุดิบหลัก	41
2.2.4	การขยายผลในโรงงานกระเบื้องดินเผาungหลวงคา CVB	45
2.3	การถ่ายทอดเทคโนโลยี	54

หัวข้อ		หน้า
2.4	การสำรวจความพึงพอใจต่อผลิตภัณฑ์	55
บทที่ 3	สรุปและอภิปรายผลการดำเนินงานวิจัย	57
	รายงานสรุปการเงินในรอบ 15 เดือน	60
	บรรณานุกรม	61
	ภาคผนวก	64
ก	การใช้ดินเหนียวล้าปางเป็นวัตถุดิบหลักในเนื้อดินปั้น	64
ข	ลักษณะชิ้นงานเนื้อดินปั้นที่ใช้ในการทดสอบสมบัติต่าง ๆ	67
ค	การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน	68
ง	การทดสอบการเกิดสาหร่ายบนกระเบื้องดินเผา	70
จ	กำหนดการถ่ายทอดเทคโนโลยี	73
ฉ	แบบสอบถามความคิดเห็นเกี่ยวกับปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจเลือกใช้กระเบื้องดินเผาungหลังกา	74
ช	ตารางเปรียบเทียบวัตถุดิบประสงค์ กิจกรรมที่วางแผนไว้และกิจกรรมที่ดำเนินการมาและผลที่ได้รับตลอดโครงการ	76
ซ	บทความเผยแพร่	77
	ตาราง เปรียบเทียบ Output ที่เสนอในข้อเสนอโครงการและที่ดำเนินการได้จริง	84
	ข้อคิดเห็นและข้อเสนอแนะอื่นๆ ต่อ สกว.	85

สารบัญตาราง

หัวข้อ			หน้า
บทที่ 1			
ตารางที่	1.1	ขนาดของกระเบื้องดินเผาungหลังคาที่จำหน่ายในท้องตลาด	10
ตารางที่	1.2	องค์ประกอบทางเคมีของแหล่งดินจากรายงานการศึกษาที่ผ่านมา และ การวิเคราะห์สัดส่วน $\text{SiO}_2:\text{Al}_2\text{O}_3$ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	21
ตารางที่	1.3	รายการวิเคราะห์ทดสอบสมบัติของดินเหนียวตัวอย่าง	24
ตารางที่	1.4	ร้อยละ (%) โดยน้ำหนักของวัตถุดิบในสูตรเนื้อดินปั้นที่ใช้ดินเหนียวป่า โมกเป็นวัตถุดิบหลัก	25
ตารางที่	1.5	ร้อยละ (%) โดยน้ำหนักของวัตถุดิบในสูตรเนื้อดินปั้นที่ใช้ดินเหนียวบ้าน เบิกเป็นวัตถุดิบหลัก	25
ตารางที่	1.6	ร้อยละ (%) โดยน้ำหนักของวัตถุดิบในสูตรเนื้อดินปั้นที่ใช้ดินเหนียวผักไห่ เป็นวัตถุดิบหลัก	26
ตารางที่	1.7	รายการทดสอบชิ้นงานเนื้อดินปั้นก่อนเผา	27
ตารางที่	1.8	รายการทดสอบชิ้นงานเนื้อดินปั้นหลังเผา	28
บทที่ 2			
ตารางที่	2.1	ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ	32
ตารางที่	2.2	ลวิเคราะห์ปริมาณกากค้างตะแกรงและผลวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของดิน เหนียว	33
ตารางที่	2.3	ผลการทดสอบปริมาณซัลเฟตของดินเหนียว	34
ตารางที่	2.4	ร้อยละ (%) ของปริมาณออกไซด์ในสูตรเนื้อดินปั้นที่ใช้ดินเหนียวป่าโมก เป็นวัตถุดิบหลัก	35
ตารางที่	2.5	สมบัติก่อนเผาของชิ้นงานที่เตรียมจากสูตรเนื้อดินปั้นโดยใช้ดินเหนียวป่า โมกเป็นวัตถุดิบหลัก	36
ตารางที่	2.6	สมบัติหลังเผาที่อุณหภูมิ 1,150 องศาเซลเซียส ของชิ้นงานที่เตรียมจาก สูตรเนื้อดินปั้นโดยใช้ดินเหนียวป่าโมกเป็นวัตถุดิบหลัก	37
ตารางที่	2.7	ร้อยละ (%) ของปริมาณออกไซด์ในสูตรเนื้อดินปั้นที่ใช้ดินเหนียวผักไห่ เป็นวัตถุดิบหลัก	38
ตารางที่	2.8	สมบัติก่อนเผาของชิ้นงานที่เตรียมจากสูตรเนื้อดินปั้นโดยใช้ดินเหนียวผัก ไห่เป็นวัตถุดิบหลัก	39
ตารางที่	2.9	สมบัติหลังเผาที่อุณหภูมิ 1,150 องศาเซลเซียสของชิ้นงานที่เตรียมจาก สูตรเนื้อดินปั้นโดยใช้ดินเหนียวผักไห่เป็นวัตถุดิบหลัก	39

	หัวข้อ	หน้า
ตารางที่	2.10 สมบัติหลังเผาที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียสของชิ้นงานที่เตรียมจาก สูตรเนื้อดินปั้นโดยใช้ดินเหนียวผกไท่เป็นวัตถุดิบหลัก	40
ตารางที่	2.11 ร้อยละ (%) ของปริมาณออกไซด์ในสูตรเนื้อดินปั้นที่ใช้ดินเหนียวบ้านเบิก เป็นวัตถุดิบหลัก	42
ตารางที่	2.12 สมบัติก่อนเผาของชิ้นงานที่เตรียมจากสูตรเนื้อดินปั้นโดยใช้ดินเหนียว บ้านเบิกเป็นวัตถุดิบหลัก	42
ตารางที่	2.13 สมบัติหลังเผาที่อุณหภูมิ 1,150 องศาเซลเซียส ของชิ้นงานที่เตรียมจาก สูตรเนื้อดินปั้นโดยใช้ดินเหนียวบ้านเบิกเป็นวัตถุดิบหลัก	43
ตารางที่	2.14 สมบัติหลังเผาที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียสของชิ้นงานที่เตรียมจาก สูตรเนื้อดินปั้นโดยใช้ดินเหนียวบ้านเบิกเป็นวัตถุดิบหลัก	43
ตารางที่	2.15 สมบัติก่อนเผาของชิ้นงานที่เตรียมจากสูตรเนื้อดินปั้นโดยใช้ดินเหนียว บ้านเบิกเป็นวัตถุดิบหลัก	44
ตารางที่	2.16 สมบัติหลังเผาที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียสของชิ้นงานที่เตรียมจาก สูตรเนื้อดินปั้นโดยใช้ดินเหนียวบ้านเบิกเป็นวัตถุดิบหลัก	44
ตารางที่	2.17 ร้อยละ (%) ของปริมาณออกไซด์ในสูตรเนื้อดินปั้นที่ใช้ดินเหนียวบ้านเบิก (lot No.2) เป็นวัตถุดิบหลัก	45
ตารางที่	2.18 สมบัติก่อนเผาของชิ้นงานที่เตรียมจากสูตรเนื้อดินปั้น NLB-1	46
ตารางที่	2.19 สมบัติหลังเผาที่อุณหภูมิ 1,100 และ 1,150 องศาเซลเซียส ของชิ้นงานที่ เตรียมจากสูตรเนื้อดินปั้น NLB-1	46
ตารางที่	2.20 ร้อยละ (%) โดยน้ำหนักของวัตถุดิบในสูตรเนื้อดินปั้น NLB-1+B	48
ตารางที่	2.21 ร้อยละ (%) ของปริมาณออกไซด์ในสูตรเนื้อดินปั้น NLB-1+B	49
ตารางที่	2.22 สมบัติก่อนเผาของชิ้นงานที่เตรียมจากสูตรเนื้อดินปั้น NLB-1+B	49
ตารางที่	2.23 สมบัติหลังเผาที่อุณหภูมิ 1,150 องศาเซลเซียส ของชิ้นงานที่เตรียมจาก สูตรเนื้อดินปั้น NLB-1+B	49

สารบัญภาพ

	หัวข้อ	หน้า
บทที่ 1		
ภาพที่ 1.1	ส่วนผสมของเนื้อดินปั้นไทรแอกเซียล	4
ภาพที่ 1.2	เฟสไดอะแกรมระบบพื้นฐานของ K_2O Al_2O_3 และ SiO_2	5
ภาพที่ 1.3	การเปลี่ยนแปลงความยาวของผลึกซิลิกาแต่ละโครงสร้าง	6
ภาพที่ 1.4	การขยายตัวทางความร้อนของวัสดุสโตนแวร์ที่แตกและไม่แตก	6
ภาพที่ 1.5	กระเบื้องดินเผาแบบไม่เคลือบผิวและเคลือบผิว	9
ภาพที่ 1.6	การมุงหลังคาแบบกระเบื้องปูหลังคาชั้นเดียว	11
ภาพที่ 1.7	การมุงหลังคาแบบกระเบื้องปูหลังคาชั้นเดียวโดยใช้กระเบื้องว่าวที่มีร่องกันน้ำ	12
ภาพที่ 1.8	รูปแบบการมุงกระเบื้องสองชั้น	12
ภาพที่ 1.9	การผลิตกระเบื้องแบบ stiff mud process	13
ภาพที่ 1.10	การผลิตกระเบื้องแบบ soft mud process ที่บ้านท่านางหอม จังหวัดสงขลา	14
ภาพที่ 1.11	กระเบื้องดิบหลังขึ้นรูปแบบ soft mud process และเตาเผากระเบื้องที่บ้านท่านางหอม จังหวัดสงขลา	14
ภาพที่ 1.12	การปั้นกระเบื้องดินเผาหลังคาด้วยมือ ที่บ้านป่าตาล จังหวัดเชียงใหม่	14
ภาพที่ 1.13	แหล่งดินตำบลดงพระยาบันลือ จังหวัดพระนครศรีอยุธยา	16
ภาพที่ 1.14	แหล่งดินตำบลดงป่าหล่อ จังหวัดอ่างทอง	17
ภาพที่ 1.15	แหล่งดินตำบลดงบ้านเบิก จังหวัดลพบุรี	18
ภาพที่ 1.16	แหล่งดินตำบลดงตาหงาย จังหวัดนครสวรรค์	19
ภาพที่ 1.17	แผนภาพแสดงช่วงสัดส่วน $SiO_2:Al_2O_3$ (ระหว่างเส้นสีเหลือง) ของดินเหนียวที่นำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเครื่องปั้นดินเผา	22
บทที่ 2		
ภาพที่ 2.1	ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD ของดินเหนียวทั้ง 4 แหล่ง	33

	หัวข้อ	หน้า
ภาพที่ 2.2	ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD ของเนื้อดินปั้นสูตร PH-1 หลังเผาที่ 1,100 องศาเซลเซียส	41
ภาพที่ 2.3	สมบัติก่อนและหลังเผาที่อุณหภูมิ 1,100 และ 1,150 องศาเซลเซียส ของชิ้นงานที่เตรียมจากสูตรเนื้อดินปั้น NLB-1	46
ภาพที่ 2.4	ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD ของเนื้อดินปั้นสูตร NLB-1 หลังเผาที่ 1,150 องศาเซลเซียส	47
ภาพที่ 2.5	ผลวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนเนื้อดินปั้นสูตร NLB-1	48
ภาพที่ 2.6	สมบัติก่อนและหลังเผาที่อุณหภูมิ 1,150 องศาเซลเซียส ของชิ้นงานที่เตรียมจากสูตรเนื้อดินปั้น NLB-1 และ NLB-1+B	50
ภาพที่ 2.7	ลักษณะกระเบื้องมุงหลังคาที่ขึ้นรูปด้วยสูตร NLB-1+B หลังเผาที่ 1,150 องศาเซลเซียส	51
ภาพที่ 2.8	ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD ของเนื้อดินปั้นสูตร NLB-1+B หลังเผาที่ 1,150 องศาเซลเซียส	52
ภาพที่ 2.9	ผลวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนเนื้อดินปั้นสูตร NLB-1+B	53
ภาพที่ 2.10	ลักษณะกระเบื้องมุงหลังคาที่ขึ้นรูปด้วยสูตร NLB-1+B หลังเผาที่ 1,150 องศาเซลเซียส หลังเคลือบ	54
ภาพที่ 2.11	แผนผังสรุปผลการพัฒนาเนื้อดินปั้นจากแหล่งดินต่าง ๆ	54
ภาพที่ 2.12	กิจกรรมในการถ่ายทอดเทคโนโลยี ณ บริษัท ซีวีบี เซรามิก จำกัด	55
ภาพที่ 2.13	ลักษณะการทำงานและการผลิตชิ้นงานในโรงงานของ บริษัท ซีวีบี เซรามิก จำกัด	55

บทที่ 1

บทนำ

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญ และที่มาของปัญหา

ในปัจจุบันผลิตภัณฑ์เซรามิกที่ทำจากดินเหนียวท้องถิ่นที่ให้สีหลังเผาเป็นสีแดง หรือเรียกให้เข้าใจง่ายว่า “ดินแดง” มีหลากหลายประเภท ซึ่งแบ่งกลุ่มผลิตภัณฑ์ได้ดังนี้

- 1) สินค้าเครื่องใช้บนโต๊ะอาหารและเครื่องครัว เช่น หม้อจืด หม้อดินเผา ผลิตภัณฑ์งานเซรามิกประเภท Terracotta เตาไฟดินเผา
- 2) สินค้าประเภทเครื่องตกแต่งบ้าน เช่น โอ่งราชบุรี ตุ๊กตาดินเผา กระถาง แจกัน
- 3) สินค้าที่ใช้เป็นวัสดุก่อสร้าง เช่น กระเบื้องปูพื้นและบุผนัง กระเบื้องผนังหลังคา อิฐมอญ

ผลิตภัณฑ์ดินแดงเหล่านี้ยังเป็นที่ต้องการและยังคงได้รับความนิยม เนื่องจากมีราคาถูกและสีสันทึบเป็นเอกลักษณ์ในตัวเอง อีกทั้งผู้ผลิตสามารถหาวัตถุดิบได้ง่ายและมีการผลิตในระดับชุมชนกระจายอยู่ทั่วทุกภูมิภาค ซึ่งสินค้าในกลุ่มวัสดุก่อสร้างเป็นสินค้าที่มีความน่าสนใจสำหรับผู้ประกอบการในการลงทุนผลิต เนื่องจากอุตสาหกรรมกลุ่มนี้มีตลาดรองรับอย่างกว้างขวาง

ในบรรดาวัสดุก่อสร้าง กระเบื้องดินเผาผนังหลังคาเป็นอีกผลิตภัณฑ์หนึ่งที่มีกลุ่มลูกค้ากระจายอยู่ทั่วประเทศ เนื่องจากสามารถนำไปใช้กับสิ่งก่อสร้างที่หลากหลาย ได้แก่ หลังคาอุโบสถ หลังคาบ้านทรงไทย หลังคาอาคารสิ่งก่อสร้างที่มีสถาปัตยกรรมเชิงอนุรักษ์ อาคารร้านค้า โรงแรมและรีสอร์ท เป็นต้น สินค้ากลุ่มนี้เมื่อมีการสั่งซื้อจะมีคำสั่งซื้อในปริมาณมาก และยังมีการเติบโตของตลาดอย่างต่อเนื่อง กระเบื้องดินเผาผนังหลังคาที่ใช้ดินเหนียวท้องถิ่นเพียงอย่างเดียวหรือดินเหนียวผสมเป็นวัตถุดิบหลักแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ กระเบื้องหลังคาที่ใช้ดินแดงผสมชนิดเคลือบ และกระเบื้องหลังคาที่ใช้ดินแดงผสมแบบไม่มีเคลือบ

สินค้ากระเบื้องหลังคาที่ใช้ดินแดงผสมชนิดแบบไม่มีเคลือบนั้น ในปัจจุบันแม้ว่าจะมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน แต่ก็ยังมีปัญหาเฉพาะตัวของผลิตภัณฑ์ เช่น เกิดคราบดำ สีของชิ้นงานไม่สม่ำเสมอ หรือเนื้อผลิตภัณฑ์ไม่แข็งแรง ทำให้ต้องผลิตกระเบื้องที่มีความหนาเป็นผลให้มีน้ำหนักสูงชิ้นตามมา ซึ่งผลิตภัณฑ์ดินแดงดังกล่าวต้องเผาที่อุณหภูมิ 950 ถึง 1,150 องศาเซลเซียส และใช้เวลานานราว 7 วันพบว่ากระเบื้องทั่วไปมีค่าการดูดซึมน้ำสูงระหว่างร้อยละ 10 ถึง 20 ซึ่งจะมีผลให้เกิดการสะสมของเชื้อราและคราบดำบนชิ้นงาน ไม่ทนต่อการแช่เยือกแข็งและการละลายของน้ำที่อยู่ในรูพรุน (Freeze thaw resistance) เมื่อนำไปใช้ในภูมิภาคที่มีอากาศแต่ละฤดูกาลแตกต่างกันมากจะทำให้อายุการใช้งานสั้นลง เนื้อกระเบื้องนี้หากนำไปเคลือบและมีการดูดซึมน้ำในส่วนที่ไม่ได้เคลือบจะทำให้เคลือบหลุดร่อนได้

ในกระบวนการผลิตของผู้ประกอบการขนาดเล็กยังไม่ได้ให้ความสำคัญกับสมบัติของกระเบื้องดินเผา มุงหลังคา มาก เพียงเลือกใช้แหล่งดินผสมและผลิตกระเบื้องให้มีความแข็งแรงในระดับที่ยอมรับได้หรือ มอก. 158-2518 ได้กำหนดไว้ แต่เป็นมาตรฐานที่ไม่ได้นำมาบังคับใช้ ผลลัพธ์ที่ได้ไม่ได้คำนึงถึงระบบผลึก ที่เกิดขึ้นหลังเผาและผู้ผลิตไม่ทราบกลไกการเปลี่ยนเฟส อาจทำให้ผลึกเกิดความเสี่ยงระหว่างผลิตได้ เช่น มีความแข็งแรงต่ำ บิดงอ่าย และเกิดเฟสคริสโตบาไลต์ (Cristobalite) ในเนื้อกระเบื้อง ทำให้ผลึกเกิด ความเสียหายได้เมื่อเปิดประตูเตาที่อุณหภูมิสูง หรือมีอัตราการลดอุณหภูมิเร็วเกินไปในช่วงที่เกิด การเปลี่ยนเฟส

ในงานวิจัยนี้จึงมุ่งหาแนวทางพัฒนาผลึกกระเบื้องหลังคาดินเผาแบบไม่เคลือบ (Terracotta roof tile) ที่เตรียมจากวัตถุดิบดินแดงท้องถิ่นผสมกับวัตถุดิบอื่น ๆ สำหรับงานเซรามิก จึงมุ่งเน้นให้ผลึก มีสมบัติดังนี้

- ค่าดูดซึมน้ำต่ำกว่าร้อยละ 1
- ควบคุมส่วนผสมให้สามารถเกิดเฟสมัลไลต์ (Mullite) มากที่สุดหลังเผาที่อุณหภูมิ 1,100 และ 1,150 องศาเซลเซียส
- ลดการเกิดเฟสคริสโตบาไลต์ในระดับที่ไม่ส่งผลกระทบต่อความเสียหายของผลึก
- กระเบื้องดินเผาหลังคาที่ได้ไม่เกิดคราบเกลือโซเดียมหลังเผา และระหว่างการใช้งานโดยการเลือกแหล่งดินวัตถุดิบที่เหมาะสม และวิธีทางเคมีเพื่อขจัดปัญหาดังกล่าว

สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย มีประสบการณ์ในการสำรวจและวิจัยดินเหนียวท้องถิ่นสำหรับอุตสาหกรรมเซรามิกในระดับชุมชนหลายแห่งทั่วประเทศ มีข้อมูลแหล่งดินแดงในประเทศไทย มากกว่า 20 แหล่ง จึงมีแนวคิดที่จะส่งเสริมการใช้ดินแดงท้องถิ่นที่มีศักยภาพให้แก่ผู้ประกอบการผลิต กระเบื้องดินเผาหลังคาในระดับ SME ซึ่งจะสามารถส่งเสริมให้เกิดการพัฒนาผลึกดังกล่าวให้เป็นที่ยอมรับในคุณภาพและเกิดความนิยมนำไปประยุกต์ใช้ในงานก่อสร้างที่หลากหลาย รวมถึงสร้างความยั่งยืนให้กับอุตสาหกรรมเซรามิกดังกล่าว

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 พัฒนาสูตรเนื้อกระเบื้องดินเผาหลังคาโดยใช้เนื้อผสมของดินแดงท้องถิ่น และเศษแก้ว
- 1.2.2 พัฒนาคูณภาพกระเบื้องดินเผาหลังคาที่มีค่าการดูดซึมน้ำต่ำกว่าร้อยละ 1 และลดการขยายตัวเนื่องจากความชื้นสูง
- 1.2.3 พัฒนาก่อนเผาที่มีคริสโตบาไลต์ต่ำเพื่อลดความเสียหายของผลึกเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงวัฏภาคขณะลดอุณหภูมิเผา

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

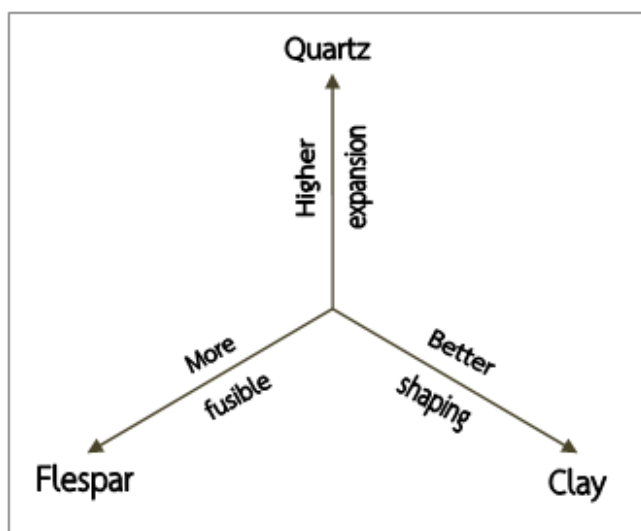
- 1.3.1 ขอบเขตกลุ่มเป้าหมาย: แหล่งดินที่จะศึกษามี 2 แหล่ง
- 1.3.2 ขอบเขตเชิงเนื้อหา: เป็นการพัฒนาเนื้อกระเบื้องดินแดงดูดซึมน้ำต่ำกว่าร้อยละ 1 และลดการเกิดคริสโตบาไลต์ที่ไม่ส่งผลต่อความเสียหายของผลิตภัณฑ์

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการ

- 1.4.1 นำความรู้มาพัฒนาคุณภาพกระเบื้องดินเผาungหลังคาที่มีอยู่แล้วให้สูงขึ้น เพื่อสร้างความเชื่อมั่นและสร้างโอกาสในทางการตลาดให้กับผู้ผลิตในระดับ SME
- 1.4.2 ได้แหล่งดินแดงที่มีศักยภาพเพื่อนำไปใช้ในการผลิตกระเบื้องดินเผาหรือผลิตภัณฑ์ดินแดงอื่น ๆ
- 1.4.3 ส่งเสริมให้เกิดการใช้วัตถุดิบในประเทศอย่างมีประสิทธิภาพ

1.5 กรอบแนวความคิดของการวิจัยและขั้นตอนการวิจัย

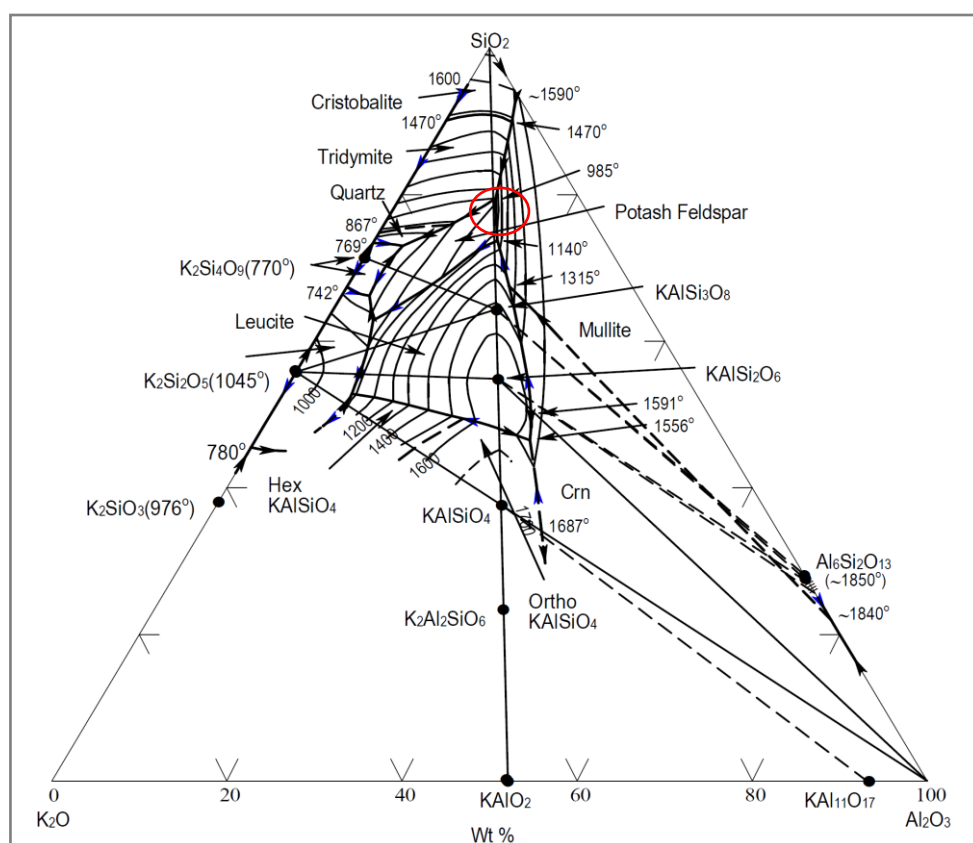
เนื้อดินปั้นของผลิตภัณฑ์เซรามิกทั้งเนื้อขาวและเนื้อแดงโดยทั่วไปประกอบด้วย แร่ดินเหนียว หินฟินม้า และควอตซ์ ซึ่งปริมาณส่วนผสมของสารเหล่านี้ในเนื้อดินปั้นมีผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติต่าง ๆ ดังแสดงในภาพที่ 1.1 ซึ่งในการผลิตต้องควบคุมสัดส่วนขององค์ประกอบเหล่านี้ให้เหมาะสม จึงจะได้คุณภาพผลิตภัณฑ์ตามต้องการ¹



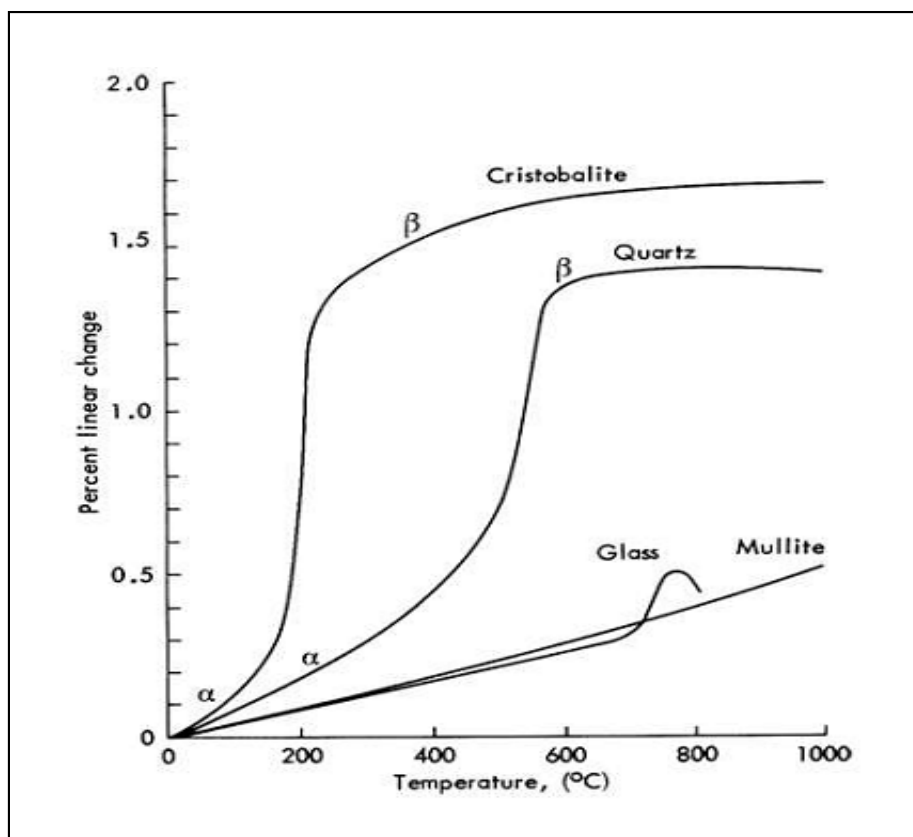
ภาพที่ 1.1 ส่วนผสมของเนื้อดินปั้นไตรแอกเซียล

สำหรับการคาดการณ์ว่าเฟสผลึกใดจะเกิดขึ้นหลังการเผาผลิตภัณฑ์ ต้องพิจารณาจากเฟสไดอะแกรมที่เกี่ยวข้องกับส่วนผสมในที่นี้คือ แร่ Feldspar ($K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$) Metakaolin ($Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$) และ Quartz (SiO_2) หรือใช้ระบบพื้นฐานของ K_2O Al_2O_3 และ SiO_2 ² ดังแสดงในภาพที่ 1.2

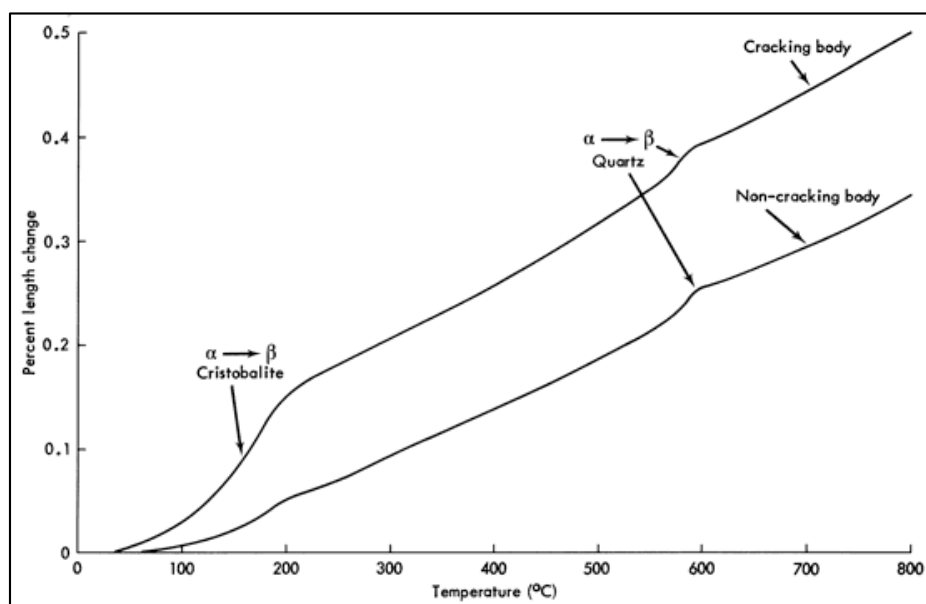
จากเฟสไดอะแกรมจะเห็นได้ว่า สัดส่วนของ $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{SiO}_2$ มีผลต่อการเกิดของมัลไลต์ เพื่อให้ได้มัลไลต์เพิ่มขึ้นต้องปรับสัดส่วนของ $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{SiO}_2$ ให้สูงขึ้น ในขณะที่เดียวกันก็ช่วยลดการเกิดคริสโตบาไลต์สำหรับมัลไลต์เป็นวัฏภาคสำคัญที่มีผลต่อการเพิ่มความแข็งแรงให้กับผลิตภัณฑ์ แต่คริสโตบาไลต์มักเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดการแตกร้าวในผลิตภัณฑ์เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงขนาดในช่วงอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส (ภาพที่ 1.3) ทำให้เกิดความเค้นในเนื้อผลิตภัณฑ์ ซึ่งถ้าเกินค่าความเค้นที่เนื้อผลิตภัณฑ์จะทนได้ก็จะทำให้เกิดการแตกร้าว (ภาพที่ 1.4) อย่างไรก็ตามเนื้อผลิตภัณฑ์ที่มีคริสโตบาไลต์เล็กน้อยจะทำให้เกิดแรงกดอัด (compression) ช่วยลดการร้าวตัวของเคลือบ³



ภาพที่ 1.2 เฟสไดอะแกรมระบบพื้นฐานของ K_2O Al_2O_3 และ SiO_2

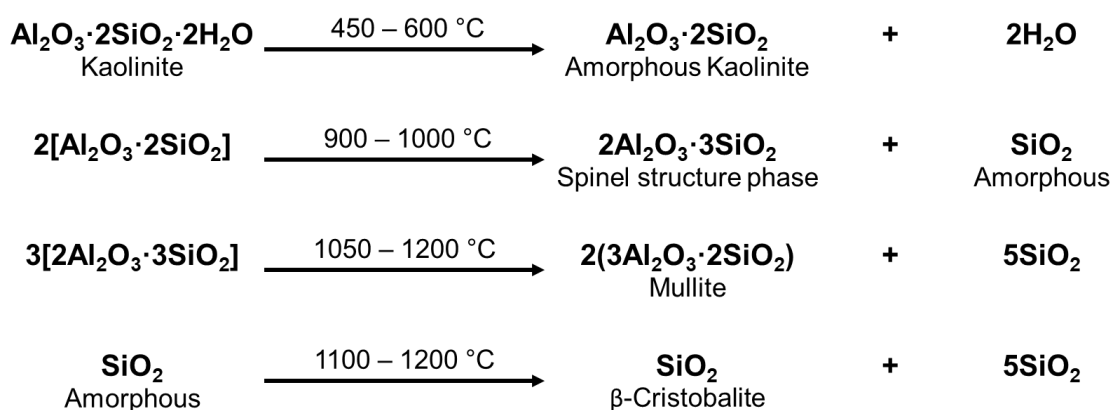


ภาพที่ 1.3 การเปลี่ยนแปลงความยาวของผลึกซิลิกาแต่ละโครงสร้าง



ภาพที่ 1.4 การขยายตัวทางความร้อนของวัสดุสโตนแวร์ที่แตกและไม่แตก

สำหรับการเกิดคริสโตบาไลต์ แสดงได้ดังปฏิกิริยาต่อไปนี้



ดังนั้น ถ้าสามารถลดปริมาณซิลิกา (SiO_2) อิสระได้จะช่วยลดการเกิดคริสโตบาไลต์ แนวทางหนึ่งคือการเพิ่มปริมาณอะลูมินา (Al_2O_3) เพื่อทำปฏิกิริยากับซิลิกาอิสระให้กลายเป็นมัลไลต์ หรือสารประกอบชนิดอื่น ๆ โดยการใช้วิธีปรับสัดส่วนของ $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{SiO}_2$ ให้สูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการปรับสัดส่วนของ $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{SiO}_2$ มีผลกระทบคือทำให้อุณหภูมิในการสุกตัวของผลิตภัณฑ์สูงขึ้น ซึ่งจะทำให้เนื้อผลิตภัณฑ์มีความพรุนตัวสูงส่งผลต่อค่าการดูดซึมน้ำของผลิตภัณฑ์ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้สารช่วยเชื่อมยึดซึ่งสามารถหลอมได้ที่อุณหภูมิไม่สูงนัก (น้อยกว่า 1,000 องศาเซลเซียส) อาทิ เศษแก้ว (cullet) เพื่อให้สามารถเผาผลิตภัณฑ์ให้มีค่าการดูดซึมน้ำได้ต่ำกว่าร้อยละ 1 เมื่อเผาไม่เกิน 1,150 องศาเซลเซียส⁴ นอกจากนี้การผสมดินแดงก็ช่วยลดอุณหภูมิการสุกตัวของผลิตภัณฑ์ได้ เนื่องจากในดินแดงมีสารช่วยลดอุณหภูมิการเผาปะปนเสมอ จากผลการศึกษาแหล่งดินแดงในประเทศของผู้วิจัยพบว่าองค์ประกอบทางเคมีและอื่น ๆ ในดินแดงจะแตกต่างกันไปตามแหล่งและวัตถุดิบต้นกำเนิดดิน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องศึกษาคัดเลือกแหล่งดินแดงที่มีศักยภาพที่จะนำมาใช้เป็นวัตถุดิบร่วมกับวัตถุดิบอื่น ๆ เพื่อให้ได้เนื้อดินปั้นที่เหมาะสมในการนำไปใช้การผลิตผลิตภัณฑ์

แนวคิดในการพัฒนากระเบื้องที่ไม่ได้ผ่านการเคลือบผิวหรือมีการเคลือบผิวบางส่วนให้ลดการเกิดราและคราบตะไคร่ระหว่างการใช้งาน ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีแล้วว่าพื้นผิวที่ไม่เรียบและมีความพรุนเป็นแหล่งสะสมและเอื้อให้สิ่งมีชีวิตขนาดเล็ก เช่น รา ตะไคร่ ตลอดจนแบคทีเรียสามารถเจริญเติบโตได้^{4,5} ในงานวิจัยนี้จะทดลองใช้เศษแก้วเป็นส่วนผสมที่จะช่วยปิดรูพรุนในขณะเผา ซึ่งคาดว่าจะช่วยลดความขรุขระของผิวกระเบื้องและลดโอกาสการเกาะติดของเชื้อราและจุลินทรีย์ได้

ปัจจัยที่มีผลต่อการทนต่อการแช่เยือกแข็งและหลอมละลายของเนื้อกระเบื้องดินเผาungหลังคานั้น มีหลายปัจจัยที่เกี่ยวข้อง เช่น ชนิดวัตถุดิบและองค์ประกอบทางเคมี กระบวนการเผา และสมบัติของผลิตภัณฑ์หลังเผาซึ่งได้แก่ การกระจายขนาดรูพรุน รูปร่างของรูพรุน และความแข็งแรงของโครงสร้าง^{6,7} Vilma Ducman และคณะ⁸ ได้ศึกษาความทนต่อการถูกแช่เยือกแข็ง (Frost resistance) ตามมาตรฐานการทดสอบ EN 539-2 และ ASTM C1167-03 พบว่า กระเบื้องดินเผาที่มีสมบัติทนต่อสภาพอากาศที่รุนแรงควรเผาที่อุณหภูมิสูงกว่า 1,055 องศาเซลเซียส ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Franke และ Bentrup⁹

ที่สรุปว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโดยมัธยฐานของรูพรุนควรจะมากกว่า 1 ไมโครเมตร และเผาที่อุณหภูมิ 1,015 และ 1,085 องศาเซลเซียส จึงจะได้กระเบื้องที่ทนต่อการแช่เยือกแข็ง

1.6 การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศที่เกี่ยวข้อง

1.6.1 กระเบื้องดินเผาungหลังคาในท้องตลาด

รูปลักษณะของหลังคาบ้านนับเป็นองค์ประกอบสำคัญอย่างหนึ่งในการสร้างสรรค์รูปทรงของบ้านให้งดงามและสอดคล้องกับประโยชน์ใช้สอยภายในบ้าน หลังคาบ้านและอาคารทำหน้าที่ป้องกันแดด รังสีจากแสงอาทิตย์ ฝน หิมะ และภัยจากธรรมชาติต่าง ๆ หลังคาเป็นส่วนที่ได้รับความร้อนจากแสงอาทิตย์มากที่สุดของบ้าน หลังคาจึงควรมีคุณสมบัติความแข็งแรง น้ำหนักเบา ทนทานต่อสภาพสิ่งแวดล้อม ไม่สะสมความร้อน พื้นผิวเรียบลดการเกาะของฝุ่น สีเคลือบมีความคงทนไม่ดูหมองในระยะยาว ปัจจุบันมีวัสดุungหลังคาหลากหลายชนิด อาทิ หลังคากระเบื้องซีเมนต์ หลังคากระเบื้องเซรามิก หลังคาไม้ แผ่นโลหะรีดลอน เพื่อให้ผู้ซื้อได้เลือกใช้ตามราคา จุดประสงค์ และความเหมาะสมกับสถาปัตยกรรม

หลังคากระเบื้องดินเผาเป็นกระเบื้องที่ให้ความรู้สึกเป็นธรรมชาติ ดูน่าหลงใหล และไม่แข็งกระด้าง สีสันทึบไม่สม่ำเสมอดูสวยงามแบบมีเอกลักษณ์ นิยมใช้ในงานที่ต้องการแสดงหลังคา เช่น โบสถ์วัด ศาลาทรงไทย บ้านทรงไทย หรือรีสอร์ท หลังคากระเบื้องดินเผามีคุณสมบัติโดยทั่วไปคล้ายกระเบื้องเซรามิกคือทนทาน แข็งแรง น้ำหนักเบา ความร้อนต่ำ และน้ำหนักเบากว่ากระเบื้องคอนกรีต อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับกระเบื้องชนิดอื่น ๆ หลังคากระเบื้องดินเผานับว่าแข็งแรงน้อยกว่า มีรูพรุนสูงทำให้สามารถดูดความชื้นได้ดี นำมาซึ่งการเกิดราดำหรือตะไคร่จับเป็นคราบสกปรกได้ง่าย ปัจจุบันได้มีการเคลือบสีแบบพิเศษทำให้ได้ผิวแบบกึ่งด้านที่ยังคงความเป็นธรรมชาติของดินเผา มีคุณสมบัติที่ช่วยลดการสะสมฝุ่นและสามารถชะล้างสิ่งสกปรกออกได้ด้วยน้ำฝน หรือการเผาที่อุณหภูมิสูงเช่นเดียวกับกระเบื้องเซรามิกเพื่อลดความพรุนตัวในเนื้อหลังคากระเบื้องดินเผา แต่อย่างไรก็ตามการเผาที่อุณหภูมิสูงเพื่อให้ความพรุนตัวลดลงทำให้เกิดปัญหาในกระบวนการผลิตคือความบิดเบี้ยว ในปัจจุบันหลังคากระเบื้องดินเผาส่วนใหญ่ยังมีความพรุนตัวสูงพอสมควร โดยค่าการดูดซึมน้ำสูงกว่าร้อยละ 5 โดยแหล่งผลิตหลังคากระเบื้องดินเผาเกือบทั้งหมดกระจายอยู่ในจังหวัดอ่างทอง อโยธยา ชลบุรี ฉะเชิงเทรา จันทบุรี นครสวรรค์ เชียงใหม่ อุบลราชธานี และสงขลา

เกณฑ์การแบ่งประเภทของกระเบื้องดินเผาungหลังคาตามลักษณะต่าง ๆ มีดังนี้

1) แบ่งตามลักษณะพื้นผิวกระเบื้อง



(ก) แบบไม่เคลือบผิว



(ข) แบบเคลือบผิว

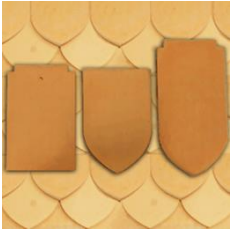
ภาพที่ 1.5 กระเบื้องดินเผาแบบไม่เคลือบผิวและเคลือบผิว

(ที่มา: <http://www.th-tile.com/>)

2) แบ่งตามลักษณะรูปร่าง

กระเบื้องดินเผาungหลังคามีหลากหลายรูปร่างตามความนิยมและความเหมาะสมกับสถาปัตยกรรมในแต่ละภูมิภาคดังแสดงในตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 ขนาดของกระเบื้องดินเผาungหลังคาที่จำหน่ายในท้องตลาด

รูปแบบ	ชื่อเรียก	ขนาด กว้าง × ยาว × หนา (ซม.)
	กระเบื้องเกล็ดปลา (ตัวสั้น)	$14 \times 20 \times 1$
	กระเบื้องเกล็ดปลา (ตัวยาว)	$14 \times 25.5 \times 1$
	กระเบื้องสุโขทัย	$16.5 \times 27.5 \times 1$
	กระเบื้องหม่อมเล็ก	$13 \times 23.5 \times 1$
	กระเบื้องหางแหลม (ตัวสั้น)	$14 \times 20 \times 1$
	กระเบื้องหางแหลม (ตัวยาว)	$14 \times 25.5 \times 1$
	กระเบื้องหม่อมใหญ่	$16 \times 26 \times 1$

ตารางที่ 1.1 ขนาดของกระเบื้องดินเผาungหลังคาที่จำหน่ายในท้องตลาด (ต่อ)

รูปแบบ	ชื่อเรียก	ขนาด กว้าง × ยาว × หนา (ซม.)
	กระเบื้องสันครอบ	14 × 49 × 1 × 7
	กระเบื้องว่าว	1 × 20 × 20

(ที่มา: เว็บไซต์กระเบื้องไม้งาม www.maingamtiles.com)

3) แบ่งตามวิธีการมุงกระเบื้อง

3.1) กระเบื้องหลังคาดินเผาแบบมุงชั้นเดียว

กระเบื้องดินเผาungหลังคาชั้นเดียว จะใช้กระเบื้องดินเผาungหลังคาชั้นเดียวบนไม้ระแนงเดียวกัน แต่จะอาศัยเรียงไม้ระแนงถี่ ๆ เพื่อให้กระเบื้องดินเผาungหลังคาบนระแนงแฉกติดไปได้มาปิดทับรอยต่อไว้ไม่ให้ น้ำฝนไหลผ่านลงใต้หลังคา สำหรับหลังคากระเบื้องดินเผาungที่ใช้มุงวิธีนี้ ได้แก่ กระเบื้องสุโขทัย กระเบื้องเกล็ดปลา (ตัวยาว) นอกจากนี้ยังมีกระเบื้องว่าวและกระเบื้องลอน แต่กระเบื้องดินเผาungหลังคา 2 แบบนี้อาศัยหลักการของ “บ่า/ร่อง” กันน้ำของกระเบื้อง ซึ่งแตกต่างจากกระเบื้องที่กล่าวมาก่อนหน้านี้ที่อาศัย แผ่นกระเบื้องดินเผาungทับซ้อนไว้ ภาพตัวอย่างการมุงหลังคาแบบมุงชั้นเดียวดังแสดงในภาพที่ 1.5 และ 1.6



ภาพที่ 1.6 การมุงหลังคาแบบกระเบื้องปูหลังคาชั้นเดียว



ภาพที่ 1.7 การมุงหลังคาแบบกระเบื้องปูหลังคาชั้นเดียวโดยใช้กระเบื้องว่าวที่มีร่องกันน้ำ

3.2) กระเบื้องหลังคาดินเผาแบบมุง 2 ชั้น

กระเบื้องดินเผาแบบมุง 2 ชั้นบนระแนงเดียวกัน อาศัยหลักการมุงหลังคากระเบื้องไม้ (ทางเหนือเรียก แป้นเกล็ดไม้) คือการซ้อนทับกันของกระเบื้องไม้ให้น้ำฝนเข้าระหว่างรอยต่อของแผ่น สำหรับหลังคากระเบื้องดินเผาที่ใช้การมุงวิธีนี้อาทิ กระเบื้องหม่อม โดยใช้กระเบื้องหม่อมอีกแผ่นปิดทับรอยต่อของกระเบื้องหม่อมแผ่นล่าง



ภาพที่ 1.8 รูปแบบการมุงกระเบื้องสองชั้น

1.6.2 กระบวนการผลิตกระเบื้องดินเผาหลังคา

การผลิตกระเบื้องดินเผาหลังคาในประเทศไทยนั้น นำดินเหนียวอย่างเดียวหรือผสมด้วยวัสดุอื่นมาอัดขึ้นรูปเป็นกระเบื้องโดยใช้มือหรือเครื่องจักร ซึ่งแบ่งได้เป็น 2 แบบดังนี้

1) กระบวนการผลิตแบบ stiff mud process

กระบวนการผลิตแบบนี้เริ่มจากการนำดินเหนียวหมักบ่อดินทิ้งไว้จนอิมน้ำก่อนประมาณ 2 ถึง 3 วัน หรือบางโรงงานอาจใช้วิธีตากดินให้แห้งก่อนนำดินมาบดให้เป็นผง ดินเหนียวที่ผ่านการหมักน้ำแล้วจะนำมาบดด้วยเครื่อง pug mill เพื่อให้เนื้อดินมีความเหนียวดีขึ้นและมีความชื้นสม่ำเสมอ แต่ถ้าเป็นดินผงจะมีการเติมน้ำลงระหว่างที่บดด้วยเครื่อง pug mill เพื่อปรับความชื้นของเนื้อดิน นำเนื้อดินผสมน้ำมารีดผ่านเครื่องรีด (extruder) โดยรีดเป็นแผ่น ซึ่งในขั้นตอนนี้ความชื้นควรมีประมาณร้อยละ 20 ถึง 25 เพื่อให้สามารถ

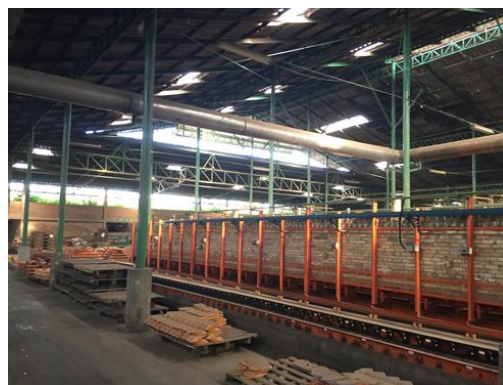
รีดเป็นแผ่นได้ อย่างไรก็ตามดินเหนียวบางแหล่งอาจต้องการน้ำมากกว่านี้ซึ่งขึ้นกับขนาดอนุภาคดินเหนียว หลังจากการรีดได้ดินแผ่นแล้วต้องผึ่งให้แห้งหมาดโดยจะมีความชื้นร้อยละ 10 หลังจากนั้นนำไปอัดขึ้นรูปโดยใช้เครื่องอัดซึ่งมีหลายชนิดอาทิ เครื่องไฮดรอลิก (hydraulic press) เครื่องอัดแบบเกลียว (screw press) และเครื่องอัดแบบคั่นโยก (toggle press) ชิ้นงานที่ขึ้นรูปได้ตามแบบและสวดลายแล้วจะถูกนำไปตากในที่ร่มจนแห้งขาว (leather hard) แล้วจึงนำไปเผาโดยเตาที่ใช้เผามีทั้งเตาแบบที่ใช้ฟืนและเตาแบบที่ใช้แก๊สเป็นเชื้อเพลิง การผลิตกระเบื้องดินเผาungหลังคาด้วยวิธีนี้มักพบในโรงงานต่าง ๆ เช่นในพื้นที่จังหวัดอ่างทอง และชลบุรี



(ก) กระเบื้องดิบ
หลังตากแห้ง



(ข) กระเบื้องหลังเผา



(ค) เตาเผากระเบื้องดินเผา

ภาพที่ 1.9 การผลิตกระเบื้องแบบ stiff mud process

2) กระบวนการผลิตแบบ soft mud process

กระบวนการผลิตแบบนี้จะมีน้ำผสมมากกว่าแบบแรก การขึ้นรูปจะใช้แม่พิมพ์ไม้หรือแม่พิมพ์เหล็กโรยด้วยซีเมนต์บนแม่พิมพ์แล้วนำดินเหนียวที่นวดแล้วปริมาณพอดีกับแม่พิมพ์มากดด้วยมือ หรือใช้เข้าเหยียบให้ดินเหนียวแนบไปกับแม่พิมพ์ ทำการตัดปาดหน้าดินเหนียวส่วนเกินออกตามรูปพิมพ์ ตกแต่งลายและนำไปตากแห้งแล้วจึงเผา ซึ่งเชื้อเพลิงที่ใช้ส่วนใหญ่จะเป็นฟืน ลำดับการขึ้นรูปแสดงในภาพที่ 1.9 การผลิตกระเบื้องดินเผาungหลังคาแบบนี้มีการผลิตในระดับชุมชนและหลงเหลือผู้ผลิตน้อยมาก แหล่งที่ผู้วิจัยได้เคยไปเยี่ยมชมคือ หมู่ที่ 6 บ้านท่านางหอม ตำบลน้ำน้อย อำเภอลาดใหญ่ จังหวัดสงขลา และที่สืบค้นได้จากเว็บไซต์คือ บ้านป่าตาล จังหวัดเชียงใหม่



ภาพที่ 1.10 การผลิตกระเบื้องแบบ soft mud process ที่บ้านท่านางหอม จังหวัดสงขลา



ภาพที่ 1.11 กระเบื้องดิบหลังขึ้นรูปแบบ soft mud process และเตาเผากระเบื้อง
ที่บ้านท่านางหอม จังหวัดสงขลา



ภาพที่ 1.12 การปั้นกระเบื้องดินเผาบางหลังคาด้วยมือ ที่บ้านป่าตาล จังหวัดเชียงใหม่

1.6.3 มาตรฐานหลังคากระเบื้องดินเผา

ประเทศไทยได้กำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาungหลังคามาตรฐานเลขที่ มอก. 158-2518 ซึ่งได้กำหนดชั้นคุณภาพกระเบื้องดินเผาungหลังคาเป็น 2 ชั้นคุณภาพได้แก่ ชั้นคุณภาพที่ 1 กระเบื้องทำด้วยเครื่องจักร และชั้นคุณภาพที่ 2 กระเบื้องทำด้วยมือ โดยมีคุณลักษณะทั่วไปคือ เมาสุกจนเนื้อ กระเบื้องมีความแกร่งตัวสม่ำเสมอตลอดแผ่น เคลือบกระเบื้องจะต้องมีความมันสม่ำเสมอทั่วกัน และรูปร่าง เรียบร้อยไม่มีรอยแตกร้าว รอยบิ่น รวมถึงมีสมบัติทางกายภาพคือค่าการดูดซึมน้ำไม่สูงเกินร้อยละ 13.5 และการต้านแรงทางขวางไม่น้อยกว่า 70 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (ประมาณ 7 เมกะปาสคาล)

1.6.4 แหล่งดินเหนียว

แหล่งดินเหนียวที่สามารถนำมาใช้ผลิตผลิตภัณฑ์เครื่องปั้นดินเผา รวมทั้งกระเบื้องดินเผาungหลังคา พบได้ทั่วไปในบริเวณที่ราบของแม่น้ำสายต่าง ๆ ของประเทศ ซึ่งมีลักษณะเป็นที่ราบน้ำท่วมถึงและ ที่ราบแม่น้ำ ในภาคเหนือพบบริเวณที่ราบลุ่มแม่น้ำปิง วัง ยม และน่าน ภาคตะวันออกเฉียงเหนือพบได้ใน บริเวณแอ่งโคราช ภาคตะวันออกพบบริเวณที่ราบลุ่มแม่น้ำบางปะกง ภาคตะวันตกพบบริเวณที่ราบลุ่มแม่น้ำ แม่กลอง และภาคใต้พบบริเวณที่ราบลุ่มแม่น้ำตาปีและปากพนัง

สำหรับแหล่งดินเหนียวในการศึกษารั้จะเน้นในบริเวณภาคกลาง เนื่องจากใกล้กับแหล่งการผลิต กระเบื้องดินเผาungหลังคาหลายแห่ง โดยมักพบแหล่งผลิตอยู่บริเวณใกล้กับแหล่งดินที่ราบลุ่มเจ้าพระยา ตอนบน (จังหวัดอุตรดิตถ์ สุโขทัย พิษณุโลก พิจิตร กำแพงเพชร และบางส่วนของจังหวัดนครสวรรค์) และตอนล่าง (บางส่วนของจังหวัดนครสวรรค์ ชัยนาท สิงห์บุรี อ่างทอง ลพบุรี อยุธยา กรุงเทพมหานคร และสมุทรปราการ) ซึ่งดินวัตถุดิบสำหรับผลิตกระเบื้องดินเผาungนี้เกิดจากการพัดพาตะกอนของแม่น้ำมาสะสมตัว ในพื้นที่ที่เคยอยู่ใต้ระดับน้ำทะเลมาก่อนจนกลายเป็นพื้นที่ราบกว้างใหญ่โผล่เหนือระดับน้ำทะเล สำหรับแม่น้ำ สายสำคัญ ๆ ที่ได้พัดพาตะกอนมาสะสมจนได้ที่ราบลุ่มภาคกลางประกอบด้วย

ภาคเหนือ คือ แม่น้ำปิง แม่น้ำวัง แม่น้ำยม และแม่น้ำน่าน

ภาคกลาง คือ แม่น้ำเจ้าพระยา

ภาคตะวันตก คือ แม่น้ำแม่กลอง และแม่น้ำสะแกกรัง

ภาคตะวันออก คือ แม่น้ำป่าสัก แม่น้ำลพบุรี และแม่น้ำบางปะกง

ในงานวิจัยที่ผ่านมา (โครงการการยกระดับคุณภาพผลิตภัณฑ์และวัตถุดิบสำหรับอุตสาหกรรมเซรามิก 2553) ได้ทำการสำรวจแหล่งดินเหนียวในบางจังหวัดของภาคกลาง ซึ่งเป็นดินเหนียวที่ได้นำมาใช้ในโรงงาน

เครื่องปั้นดินเผาและโรงงานผลิตวัสดุก่อสร้างในระดับอุตสาหกรรมขนาดกลางและขนาดย่อม ซึ่งจะได้นำเสนอโดยสังเขปดังนี้

1) แหล่งดินตำบลดงพระยาบันลือ จังหวัดพระนครศรีอยุธยา

แหล่งดินนี้อยู่ในบริเวณตำบลดงพระยาบันลือ อำเภอลาดบัวหลวง จังหวัดพระนครศรีอยุธยา ลักษณะพื้นที่เป็นที่ราบลุ่มน้ำท่วมถึง ดินเหนียวบริเวณนี้เกิดจากแม่น้ำล้นฝั่งในฤดูน้ำหลาก ตะกอนมีเนื้อละเอียด ซึ่งถูกพัดพามาสะสมตัวอย่างต่อเนื่องและยาวนาน ลักษณะของชั้นดินประกอบด้วย

ชั้นที่ 1 เป็นดินชั้นบน เนื้อดินเป็นดินเหนียวมีสีน้ำตาลแกมเทา พบที่ความลึกตั้งแต่ผิวดินลงไปประมาณ 0 ถึง 0.20 เมตร มีความหนาประมาณ 0.02 เมตร

ชั้นที่ 2 เป็นชั้นดินเหนียวสำหรับปั้น พบที่ความลึกประมาณ 0.20 ถึง 1.20 เมตร มีสีน้ำตาลปนเทา ถึงเทาเข้ม มีความหนาชั้นดินประมาณ 1 เมตร

ชั้นที่ 3 เนื้อดินเป็นดินเหนียวปนโคลนสีน้ำตาลแกมเทาถึงเขียว พบที่ความลึกประมาณ 1.20 ถึง 2.00 เมตร มีความหนาประมาณ 0.8 เมตร เป็นชั้นดินตะกอนน้ำทะเลที่เป็นดินเลนหรือโคลน

ปริมาณดินเหนียวสำรอง

จากการคำนวณพบว่าปริมาณดินเหนียวของแหล่งดินตำบลดงพระยาบันลือ อำเภอลาดบัวหลวง จังหวัดพระนครศรีอยุธยานี้มีประมาณ 643,279 ลูกบาศก์เมตร หรือ 1,736,861 เมตริกตัน

การใช้ประโยชน์ของพื้นที่

ปัจจุบันพื้นที่นี้จะใช้ประโยชน์เป็นพื้นที่เกษตรกรรมและนาข้าว ช่วงหน้าแล้งจึงมีการขุดดินเหนียวขาย



ภาพที่ 1.13 แหล่งดินตำบลดงพระยาบันลือ จังหวัดพระนครศรีอยุธยา

2) แหล่งดินตำบลดงป่าหล่อ จังหวัดอ่างทอง

ดินเหนียวจากแหล่งดินนี้ได้นำมาใช้เป็นวัตถุดิบในโรงงานผลิตอิฐและกระเบื้องในอำเภอบางปะอิน นอกเหนือจากดินแหล่งอื่น ๆ แหล่งดินตั้งอยู่ในบริเวณตำบลดงป่าหล่อ อำเภอเมืองอ่างทอง จังหวัดอ่างทอง ลักษณะภูมิประเทศเป็นที่ราบลุ่มน้ำท่วมถึง มีความสูงจากระดับน้ำทะเลปานกลางประมาณ 6 เมตร ดินเหนียวบริเวณนี้เกิดจากตะกอนของลำน้ำที่พัดพามาทับถมกันเป็นเวลานานและตะกอนดินที่เอ่อล้นตามฤดูกาล ลักษณะของชั้นดินประกอบด้วย

- ชั้นที่ 1 เป็นชั้นดินบนเนื้อดินเหนียวปนดินร่วนสีน้ำตาล พบที่ความลึกตั้งแต่ประมาณ 0 ถึง 0.30 เมตร มีความหนาประมาณ 0.3 เมตร
- ชั้นที่ 2 เป็นชั้นดินป็น เนื้อดินเป็นดินเหนียวสีน้ำตาลปนเทาเข้ม พบที่ความลึกประมาณ 0.30 ถึง 1.80 เมตร มีความหนาประมาณ 1.5 เมตร
- ชั้นที่ 3 เป็นชั้นดินป็น เนื้อดินเป็นดินเหนียวสีน้ำตาล พบที่ความลึกประมาณ 1.80 ถึง 3.50 เมตร มีความหนาประมาณ 1.7 เมตร และพบหินฟอสเฟตที่สลายตัวไม่หมด
- ชั้นที่ 4 เนื้อดินเป็นดินเหนียวปนทรายสีน้ำตาลปนเหลืองอ่อน พบที่ความลึกประมาณ 3.50 ถึง 4.50 เมตร มีความหนาประมาณ 1 เมตร

ปริมาณดินเหนียวสำรอง

จากค่าการคำนวณ ปริมาณดินเหนียวของแหล่งดินตำบลจำปาหล่อ อำเภอเมืองอ่างทอง จังหวัดอ่างทอง มีประมาณ 5,444,875 ลูกบาศก์เมตร หรือ 14,701,172 เมตริกตัน

การใช้ประโยชน์ของพื้นที่

ปัจจุบันพื้นที่สำรวจทั้งหมดเป็นพื้นที่มีกรรมสิทธิ์ที่ดิน การใช้ประโยชน์ที่ดินเป็นพื้นที่เกษตรกรรมทำนาข้าวและสวนผลไม้



ภาพที่ 1.14 แหล่งดินตำบลจำปาหล่อ จังหวัดอ่างทอง

3) แหล่งดินตำบลบ้านเบิก จังหวัดลพบุรี

แหล่งดินนี้อยู่ในตำบลบ้านเบิก อำเภอท่าม่วง จังหวัดลพบุรี ลักษณะภูมิประเทศเป็นที่ราบลุ่มน้ำท่วมถึง มีความสูงจากระดับน้ำทะเลปานกลางประมาณ 4 เมตร ดินเหนียวที่พบในบริเวณนี้เกิดจากตะกอนของลำน้ำที่พัดพามาทับถมกันเป็นเวลานานและตะกอนดินที่เอ่อล้นตามฤดูกาล ลักษณะของชั้นดินประกอบด้วย

- ชั้นที่ 1 เป็นชั้นดินบน เนื้อดินเป็นดินร่วนปนดินเหนียว พบที่ความลึกตั้งแต่ผิวดินลงไปประมาณ 0 ถึง 0.20 เมตร มีความหนาชั้นดินประมาณ 0.2 เมตร
- ชั้นที่ 2 เป็นชั้นดินป็น เนื้อดินเป็นดินเหนียวสีน้ำตาลจุดประสีส้ม พบที่ความลึกประมาณ 0.20 ถึง 2.00 เมตร มีความหนาประมาณ 1.8 เมตร

ชั้นที่ 3 เป็นชั้นดินปน เนื้อดินเป็นดินเหนียวสีน้ำตาลปนเทา พบที่ความลึกประมาณ 2.00 ถึง 3.80 เมตร มีความหนาประมาณ 1.8 เมตร

ชั้นที่ 4 เนื้อดินเป็นดินเหนียวปนทรายหรือดินโคลนสีเทาถึงเทาเข้ม พบที่ความลึกประมาณ 3.80 ถึง 4.50 เมตร มีความหนาประมาณ 0.7 เมตร

ปริมาณดินเหนียวสำรอง

จากการคำนวณ ปริมาณดินเหนียวของแหล่งดินตำบลบ้านเบิก อำเภอท่าม่วง จังหวัดลพบุรี มีประมาณ 2,738,320 ลูกบาศก์เมตร หรือ 7,393,464 เมตริกตัน

การใช้ประโยชน์ของพื้นที่

ปัจจุบันพื้นที่สำรวจทั้งหมดเป็นที่ดินที่มีกรรมสิทธิ์ที่ดินและบางบริเวณเป็นที่สาธารณะ การใช้ประโยชน์ของพื้นที่เป็นพื้นที่ทำการเกษตรกรรม สำหรับทำนาปลูกข้าวและบางส่วนเป็นบึงน้ำขนาดใหญ่



ภาพที่ 1.15 แหล่งดินตำบลบ้านเบิก จังหวัดลพบุรี

4) แหล่งดินตำบลบางตาหงาย จังหวัดนครสวรรค์

แหล่งดินนี้อยู่ในตำบลบางตาหงาย อำเภอบรรพตพิสัย จังหวัดนครสวรรค์ ลักษณะภูมิประเทศเป็นที่ราบลุ่มน้ำท่วมถึง มีความสูงจากระดับน้ำทะเลปานกลางประมาณ 44 เมตร ดินเหนียวในบริเวณนี้เกิดจากตะกอนที่ลำนํ้าพัดพามาสะสมในที่ราบลุ่มซึ่งเป็นแอ่งสะสมตัวของตะกอนของแม่น้ำปิง ลักษณะของชั้นดินประกอบด้วย

ชั้นที่ 1 เป็นชั้นดินบน เนื้อดินเป็นดินร่วนปนดินเหนียว พบที่ความลึกตั้งแต่ผิวดินลงไปประมาณ 0 ถึง 0.20 เมตร มีความหนาประมาณ 0.2 เมตร

ชั้นที่ 2 เป็นชั้นดินปน เนื้อดินเป็นดินเหนียวสีน้ำตาล พบที่ความลึกประมาณ 0.20 ถึง 1.50 เมตร มีความหนาประมาณ 1.3 เมตร

ชั้นที่ 3 เป็นชั้นดินปน เนื้อดินเป็นดินเหนียวสีน้ำตาลปนเทา พบที่ความลึกประมาณ 1.50 ถึง 3.50 เมตร มีความหนาประมาณ 2.3 เมตร

ชั้นที่ 4 เนื้อดินเป็นดินเหนียวปนทรายสีเทาปนเหลือง พบที่ความลึกประมาณ 3.50 ถึง 4.50 เมตร มีความหนาประมาณ 1 เมตร

ปริมาณดินเหนียวสำรอง

จากค่าการคำนวณ ปริมาณดินเหนียวของแหล่งดินเหนียวตำบลบางตาหงาย อำเภอบรรพตพิสัย จังหวัดนครสวรรค์นี้ มีประมาณ 3,800,500 ลูกบาศก์เมตร หรือ 10,261,350 เมตริกตัน

การใช้ประโยชน์ของพื้นที่

ปัจจุบันพื้นที่สำรวจทั้งหมดถูกใช้ประโยชน์เป็นนาข้าวและพื้นที่เกษตรกรรมอื่น ๆ



ภาพที่ 1.16 แหล่งดินตำบลบางตาหงาย จังหวัดนครสวรรค์

1.6.5 ข้อมูลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปัจจุบันได้มีความพยายามพัฒนาเนื้อดินปั้นจากดินแดงผสมเพื่อนำมาใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ประเภทสโตนแวร์ โดยศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ได้พัฒนาสูตรเนื้อดินสโตนแวร์อุณหภูมิต่ำโดยเผาที่อุณหภูมิ 1,150 องศาเซลเซียส โดยใช้ดินแดงอ่างทองและเศษแก้วบดละเอียดเป็นส่วนผสมทำให้ค่าการดูดซึมน้ำลดลงเหลือร้อยละ 0.15 มีความแข็งแรง 64 เมกะปาสคาล และไม่พบคริสโตบาลิต⁴ ผู้วิจัยและคณะได้ทดลองผสมเหล็กออกไซด์เป็นสารช่วยลดค่าการดูดซึมน้ำในเนื้อดินปั้นที่มีการผสมดินแดงราชบุรีพบว่าค่าการดูดซึมน้ำลดลงเมื่อปริมาณเหล็กออกไซด์เพิ่มขึ้นทุกอุณหภูมิการเผา นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณควอตซ์เพิ่มขึ้นตามปริมาณของเหล็ก และผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD ปรากฏพีคของคริสโตบาลิตปะปนด้วย ในงานของ A.F. Gualtieri พบว่าการใช้แก้วที่เหลือทิ้งจากชุมชนสามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตกระเบื้องเนื้อสโตนแวร์ไฟฟ้าได้⁶ ในขณะที่ A. Tucci และคณะ⁷ รายงานเกี่ยวกับการใช้โซดาไลม์ (soda lime) ทดแทนการใช้โซเดียมเฟลด์สปาร์ (Na-feldspar) ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักทำให้ค่าการดูดซึมน้ำน้อยกว่าร้อยละ 0.5 แต่เผาที่อุณหภูมิสูงถึง 1,200 องศาเซลเซียส S. Maschio และคณะ⁸ ได้ทดลองใช้เศษแก้วที่เป็นวัตถุดิบเหลือใช้จากโรงงานผลิตกระดาดและดินเหนียวมาเป็นวัตถุดิบสำหรับการทำกระเบื้องสโตนแวร์สีแดงโดยใช้กระบวนการเผาเร็ว (fast firing) ซึ่งใช้เตาเผาในระยะเวลาเพียง 50 นาที พบว่าต้องใช้ส่วนผสมแก้วถึงร้อยละ 28 ผสมกับดินแดงร้อยละ 30 เผาเกินอุณหภูมิ 1,120 องศาเซลเซียสจึงจะได้กระเบื้องสโตนแวร์เนื้อสีแดงที่มีคุณภาพผ่านมาตรฐาน และเฟสหลักในเนื้อกระเบื้องที่ตรวจพบได้แก่ ควอตซ์ อะนอร์ไทต์ และไดออปไซด์ ไม่พบการเกิดเฟสคริสโตบาลิต ในขณะที่ E. Tiffo และคณะ⁹ ได้ทดลองนำเศษแก้วกลับมาใช้ใหม่เป็นวัตถุดิบทดแทนแร่เฟลด์สปาร์ผสมกับดินขาวที่มีเหล็กออกไซด์สูงและมีแอลคาไลน์ต่ำ พบว่าสามารถเผาได้ผลิตภัณฑ์เซรามิกสีเหลืองแดงที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส การดูดซึมน้ำที่ร้อยละ

13.7 และทนต่อแรงอัดที่ 8.1 เมกะปาสคาล นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยอื่น ๆ ที่ได้พิสูจน์ให้เห็นว่าเศษแก้วสามารถช่วยในการลดอุณหภูมิสูงสุดตัวของผลิตภัณฑ์ เช่น แก้วจากกระจกรถยนต์¹⁰ เศษแก้วโซดาไลม์จากกระจกแผ่นเรียบและบรรจุภัณฑ์แก้ว^{11,12}

นอกจากนี้ผู้วิจัยและคณะได้ทดลองเบื้องต้นเพื่อศึกษาผลของสัดส่วนของ $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.29 โดยใช้ดินแดงจังหวัดน่านร้อยละ 50 ผสมกับเศษแก้วโซดาไลม์ร้อยละ 10 ผสมกับดินขาว เฟลด์สปาร์และทรายเล็กน้อย พบว่าหลังเผาที่ 1,100 องศาเซลเซียสได้ค่าการดูดซึมน้ำประมาณร้อยละ 1.7 โดยผลจากการวิเคราะห์เนื้อผลิตภัณฑ์ด้วย XRD พบว่ายังมีคริสโตบาไลต์ปะปน จากข้อมูลการวิจัยที่ผ่านมาและทดลองข้างต้นทำให้ผู้วิจัยได้แนวคิดที่จะพัฒนาต่อโดยการปรับปรุงสัดส่วน $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{SiO}_2$ ในส่วนผสมดินปั้นที่ต่างกัน และการนำเศษแก้วซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้ในอุตสาหกรรมแก้วมาใช้ในการทดลองในงานวิจัยนี้เพื่อสร้างมูลค่าเพิ่มให้วัสดุเหลือทิ้งดังกล่าว

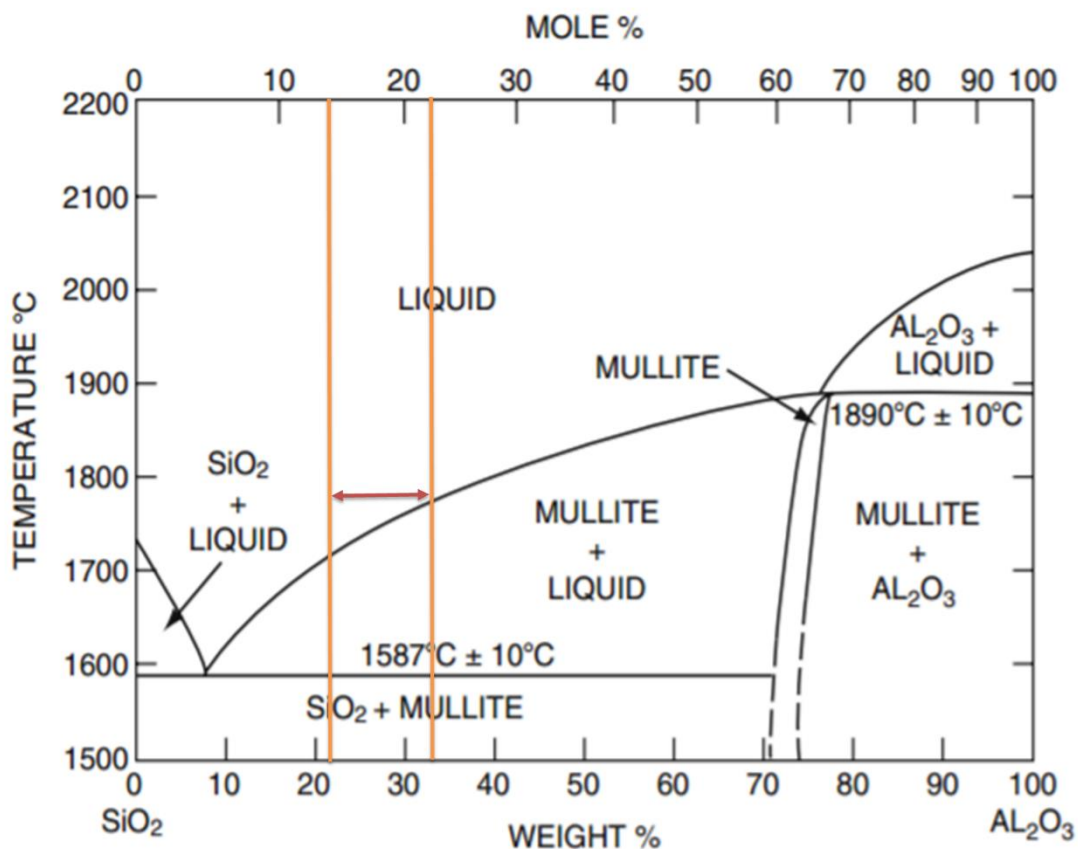
1.6.6 การศึกษาคัดเลือกแหล่งดิน

การคัดเลือกแหล่งดินสำหรับงานวิจัยนี้ได้ใช้หลักเกณฑ์การประเมินจากข้อมูลการศึกษาแหล่งดินที่ผ่านมา ประกอบกับผลวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRF และ XRD ตัวอย่างดินจากรายงานวิจัยที่เคยศึกษาไว้มีดังนี้

ตารางที่ 1.2 องค์ประกอบทางเคมีของแหล่งดินจากรายงานการศึกษาที่ผ่านมา และการวิเคราะห์สัดส่วน $\text{SiO}_2:\text{Al}_2\text{O}_3$ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

แหล่งดิน	Al_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3	TiO_2	Na_2O	K_2O	CaO	MgO	LOI	$\text{SiO}_2:\text{Al}_2\text{O}_3$	SiO_2 binary
ต.พระยา บันลือ (อยุธยา)	19.97	60.59	4.72	0.81	0.23	1.77	1.80	0.88	10.37	3.06	75.38
ต.จำปาหล่อ (อ่างทอง)	23.76	57.00	5.44	0.87	0.41	1.79	1.52	1.11	8.04	2.40	70.58
ต.บ้านเบิก (ลพบุรี)	18.65	59.57	4.72	0.95	0.29	2.04	0.57	1.06	12.14	3.19	76.16
ต.บางตาหงาย (นครสวรรค์)	24.46	53.31	6.33	0.90	0.29	2.72	0.78	1.31	9.73	2.18	68.55
ต.ป่าโมก (อ่างทอง)	21.55	51.43	5.47	0.85	0.23	2.18	0.72	1.12	16.44	2.39	70.47
ต.ผักไห่ (อยุธยา)	21.69	53.91	6.41	0.87	0.31	2.48	0.63	1.36	12.35	2.49	71.31

จากดินที่ได้เคยทำการศึกษาไว้และพบว่าสามารถนำไปทำเครื่องปั้นดินเผาได้โดยมีสัดส่วน $\text{SiO}_2:\text{Al}_2\text{O}_3$ อยู่ในช่วงที่แสดงบน binary phase ซึ่งจะเลือกแหล่งดินที่อยู่ในช่วงนี้ และร้อยละของเหล็กจะเลือกแหล่งดินที่มีเหล็กไม่ต่ำกว่าร้อยละ 4.4 เพื่อให้ผลิตภัณฑ์มีสีส้มอิฐ สำหรับดินป่าโมกมีองค์ประกอบทางเคมีที่ใช้ได้และมีปริมาณเพียงพอในการนำมาใช้เชิงพาณิชย์ รวมถึงแหล่งดินตั้งอยู่ในภาคกลางใกล้โรงงานผลิต ซึ่งเป็นการลดต้นทุนด้านการขนส่งวัตถุดิบ จึงเลือกดินป่าโมกเป็นแหล่งที่ 1 ที่จะนำมาพัฒนาในโครงการวิจัยนี้ ส่วนดินแหล่งที่ 2 ที่ได้จากการลงพื้นที่สำรวจโดยการสอบถามข้อมูลแหล่งดินที่ใช้ในการทำอิฐบริเวณใกล้เคียง พบว่าดินลพบุรีมีสมบัติเหมาะสมตามเกณฑ์พิจารณาที่กล่าวมา คณะผู้วิจัยจะดำเนินการทดลองในระยะดำเนินงานถัดไป



ภาพที่ 1.17 แผนภาพแสดงช่วงสัดส่วน SiO_2 : Al_2O_3 (ระหว่างเส้นสีเหลือง) ของดินเหนียวที่นำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเครื่องปั้นดินเผา

1.7 วิธีการดำเนินการวิจัย

ศึกษาและเก็บรวบรวมข้อมูลแล้วทำการทดลองโดยใช้วัตถุดิบเนื้อดินที่ได้จากแหล่งดินที่เลือก โดยการออกแบบสูตรส่วนผสม และทดสอบสมบัติทางกายภาพและทางกลมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1.7.1 วัตถุดิบ

- ดินเหนียวจากแหล่งดินต่าง ๆ ได้แก่ แหล่งดินป่าโมก (อ.ป่าโมก จ.อ่างทอง) แหล่งดินบ้านเบิก (อ.ท่าม่วง จ.ลพบุรี) และแหล่งดินผักไห่ (อ.ผักไห่ จ.พระนครศรีอยุธยา)
- ดินดำจากแหล่งดินต่าง ๆ ได้แก่ ดินดำลานสกา และดินดำนครศรีธรรมราช
- ดินขาวระนอง (บริษัท IMD จำกัด)
- เฟลด์สปาร์ (Super spar, บริษัท ซิเบลโก้มีเนอร์รัลส์ (ประเทศไทย) จำกัด)
- ควอตซ์ (บริษัท IMD จำกัด)
- หินสบู (บริษัท IMD จำกัด)
- หินผุ (บริษัท IMD จำกัด)
- เศษแก้ว (บริษัท CVB จำกัด)

1.7.2 อุปกรณ์และเครื่องมือวิเคราะห์ทดสอบ

- เครื่องชั่งน้ำหนัก (ทศนิยม 2 ตำแหน่ง)
- เครื่องบดผสมแบบบอลมิลล์ (Ball mill)
- เครื่องรีดดิน (Extruder)
- เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี (X-ray fluorescence)
- เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray powder diffraction)
- เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (Universal testing machine)
- เครื่องทดสอบสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Dilatometer)
- เครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาค (Particle size analyzer)
- เตาอบและเตาเผาไฟฟ้า
- อุปกรณ์ในห้องปฏิบัติการอื่น ๆ เช่น เวอร์เนียคาลิเปอร์ บ่อเกรอะปูนปลาสเตอร์ เกรียง ไม้พาย โกร่ง ตะแกรง มีด ถาดอะลูมิเนียม

1.7.3 วิธีการวิจัย

1) การเลือกแหล่งวัตถุดิบและวิเคราะห์สมบัติ

จากการศึกษาชั้นดินของแหล่งดินเหนียวสำหรับเครื่องปั้นดินเผาที่เผาแล้วให้สีแดง (Terracotta) คณะผู้วิจัยได้เลือกใช้แหล่งดินเหนียวจากพื้นที่ในตำบลป่าโมก จังหวัดอ่างทอง ตำบลบ้านเบิก จังหวัดลพบุรี และตำบลผักไห่ จังหวัดพระนครศรีอยุธยา โดยเก็บตัวอย่างจากกองดินที่มีการขุดและกองผสมไว้สำหรับขาย ให้แก่โรงงานผลิตเครื่องปั้นดินเผาและโรงงานผลิตอิฐก่อสร้าง เนื่องจากแหล่งดินดังกล่าวอยู่ใกล้โรงงาน เป้าหมายที่จะทำการผลิตกระเบื้องให้แก่โครงการวิจัยนี้ เพื่อให้มีต้นทุนวัตถุดิบและค่าขนส่งไม่สูงเกินไป นอกจากนี้ตัวอย่างดินที่ใช้ทุกชนิดจะทำการวิเคราะห์ทดสอบวัตถุดิบ โดยวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค XRF วิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ด้วยเทคนิค XRD วิเคราะห์ปริมาณกาบค้ำตะแกรงของดินเหนียวด้วยตะแกรง 325 เมช ขนาดอนุภาคของดินเหนียวด้วยเครื่อง Particle size analysis ปริมาณเกลือที่อยู่ในดิน

ตารางที่ 1.3 รายการวิเคราะห์ทดสอบสมบัติของดินเหนียวตัวอย่าง

รายการ	วิธีการ	เครื่องมือ
องค์ประกอบทางเคมี	เตรียมตัวอย่างแบบหลอม (Fuse)	XRF
องค์ประกอบทางแร่วิทยา	อัดผง	XRD
กากค้ำตะแกรง	ร่อนผ่านตะแกรง 325 เมช	ตะแกรง
การกระจายตัวของขนาดอนุภาค	Laser	Particle size analysis
ปริมาณเกลือซัลเฟตละลายน้ำ	นำน้ำที่ละลายออกจากดินไปทำปฏิกิริยากับ BaCl_2 และนำไปวัด %transmission (ASTM 867-94)	UV/VIS spectrophotometer

2) การพัฒนาสูตรดินปั้น

ในการศึกษาได้ออกแบบสูตรดินผสมเพื่อควบคุมการเกิดเฟสคริสโตบาไลต์และเพิ่มเฟสมัลไลต์ที่อุณหภูมิต่ำ โดยปรับเปลี่ยนสัดส่วนโดยน้ำหนักของ $\text{Al}_2\text{O}_3\text{:SiO}_2$ และปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของ K_2O ซึ่งจะทำให้หน้าที่ลดอุณหภูมิการเผา รวมทั้งส่งเสริมให้เกิดเฟสมัลไลต์ซึ่งจะส่งผลต่อความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์ที่สูงขึ้น โดยสูตรส่วนผสมเนื้อดินปั้นต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 1.4 ถึง 1.6 นอกจากนี้ยังได้เตรียมเนื้อดินปั้นที่มีส่วนผสมของดินเหนียวลำปางเป็นวัตถุดิบหลักเพื่อใช้เป็นตัวเปรียบเทียบสมบัติต่าง ๆ ของสูตรดิน ซึ่งมีสูตรส่วนผสมและสมบัติต่าง ๆ แสดงไว้ในภาคผนวก ก

ตารางที่ 1.4 ร้อยละ (%) โดยน้ำหนักของวัตถุบิในสูตรเนื้อดินปั้นที่ใช้ดินเหนียวป่าโมกเป็นวัตถุบิหลัก

สูตร	วัตถุบิ					
	ดินเหนียว ป่าโมก	ดินตำ ลานสกา	ดินขาว ระนอง	เฟลด์สปาร์	ควอตซ์	เศษแก้ว
P01	45.40	12.00	16.50	1.60	14.50	10.00
P02	40.30	15.70	19.60	1.10	13.30	10.00
P03	40.00	15.00	19.00	5.50	11.40	9.10
P04	39.70	14.30	18.00	9.40	10.60	8.00
P05	39.00	13.90	16.20	13.40	10.00	7.50
P06	43.30	14.90	20.75	0.90	11.75	8.40
P07	43.00	14.30	20.35	4.60	10.75	7.00
P08	42.70	13.50	19.60	8.85	9.75	5.60
P09	41.70	12.60	18.00	13.80	9.40	4.50
P10	46.00	8.00	27.00	-	10.00	9.00
P11	44.00	8.00	26.70	4.30	9.00	8.00
P12	43.00	8.00	25.00	8.80	8.00	7.20
P13	42.40	12.00	20.00	13.30	8.10	4.20

ตารางที่ 1.5 ร้อยละ (%) โดยน้ำหนักของวัตถุบิในสูตรเนื้อดินปั้นที่ใช้ดินเหนียวฝักไ้เป็นวัตถุบิ

สูตร	วัตถุบิ					
	ดินเหนียว ฝักไ้	ดินขาว ระนอง	เฟลด์สปาร์	ควอตซ์	หินสบู	เศษแก้ว
PH-1	61.70	4.40	0.50	5.00	18.40	10.00
PH0	61.00	7.10	-	5.00	16.90	10.00
PH+1	57.70	10.70	-	4.90	16.70	10.00

ตารางที่ 1.6 ร้อยละ (%) โดยน้ำหนักของวัตถุดิบในสูตรเนื้อดินปั้นที่ใช้ดินเหนียวบ้านเบิกเป็นวัตถุดิบหลัก

สูตร	วัตถุดิบ						
	ดินเหนียวบ้านเบิก	ดินขาวระนอง	ดินดำนครศรีธรรมราช	เฟลด์สปาร์	ควอตซ์	หินสบู	เศษแก้ว
LB0	57.50	19.00	-	0.60	5.00	7.90	10.00
LB-1	57.50	16.50	-	1.20	5.00	9.80	10.00
LB-2	60.30	13.50	-	1.40	5.00	9.80	10.00
LB-3	63.60	10.10	-	1.50	5.00	9.80	10.00
NLB-1	57.50	16.50	-	1.20	5.00	9.80	10.00
NLB-1+B	49.00	21.60	6.90	-	12.50	-	10.00

3) การเตรียมเนื้อดินปั้นและการขึ้นรูป

- เตรียมวัตถุดิบตามปริมาณที่ต้องการ โดยสัดส่วนของวัตถุดิบแต่ละชนิดนั้นคำนวณตามสูตรที่ได้ออกแบบไว้ในข้อที่ 2
- ทำการบดเพื่อลดขนาดอนุภาคดินด้วยเครื่องบดผสมแบบบอลมิลล์ (ball mill) เป็นเวลา 6 ชั่วโมง (สำหรับการเตรียม 2 กิโลกรัม) ซึ่งเป็นการบดแบบเปียกโดยกำหนดให้น้ำคงที่ที่ร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก
- นำน้ำดินออกจากเครื่องบดผสมไปผ่านตะแกรง 200 เมช ลงในบ่อเกรอะปูนปลาสเตอร์เป็นเวลา 1 คืน จะได้เนื้อดินที่เตรียมนำไปปั้นขึ้นรูปได้
- นำเนื้อดินปั้นไปขึ้นรูปโดยใช้วิธีการอัดดินผ่านเครื่องรีดดินให้ชิ้นงานมีลักษณะเป็นแท่งที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร
- นำแท่งชิ้นงานไปผึ่งลมให้แห้งในสภาพอากาศเป็นเวลาประมาณ 5 วัน (โดยไม่ทำการเคลื่อนย้ายในระยะ 2 วันแรกเพื่อให้ชิ้นงานคงรูป)
- นำแท่งชิ้นงานไปอบที่ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วจึงนำไปทดสอบสมบัติต่าง ๆ
- นำแท่งชิ้นงานไปเผาที่อุณหภูมิ 1,100 และ 1,150 องศาเซลเซียส ควบคุมอัตราการเผาที่ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที และระยะเย็นไฟ (soaking time) ที่อุณหภูมิสูงสุดเป็นเวลา 1 ชั่วโมง เมื่อเผาเสร็จแล้วจึงนำไปทดสอบสมบัติต่าง ๆ

4) การทดสอบชิ้นงาน

นำแท่งชิ้นงานไปทดสอบสมบัติต่าง ๆ ที่เตรียมจากเนื้อดินปั้นแต่ละสูตร เพื่อนำไปใช้เป็นเกณฑ์สำหรับคัดเลือกสูตรที่จะนำไปขยายผลในโรงงานผลิตจริง โดยจะทดสอบแท่งชิ้นงานเพื่อวิเคราะห์สมบัติทั้งก่อนและหลังเผาชิ้นงานดังตารางที่ 1.7 และ 1.8

ตารางที่ 1.7 รายการทดสอบชิ้นงานเนื้อดินปั้นก่อนเผา

รายการ	จำนวนชิ้น	วิธีการ	เครื่องมือ
การหดตัวเชิงเส้น	10	วัดความยาวโดยทำเครื่องหมายกำหนดระยะหลังขึ้นรูปไว้ที่ 10 เซนติเมตร เมื่ออบชิ้นงานแห้งแล้ว วัดค่าอีกครั้ง นำค่าที่วัดได้มา คำนวณหาร้อยละการหดตัว	เวอร์เนียคาลิเปอร์
ความแข็งแรงต่อแรงดัด	10	ทดสอบความแข็งแรงของชิ้นงานที่ระยะ span length 8 เซนติเมตร (ดัดแปลงจากมาตรฐานการทดสอบ ASTM 674-88)	Universal Testing Machine (UTM)
ความเหนียว	3	การเปรียบเทียบระยะการยุบตัวของเนื้อดิน โดยรายงานเป็นค่า Pfefferkorn index (ASTM 4318-00)	Pfefferkorn test

ตารางที่ 1.8 รายการทดสอบชิ้นงานเนื้อดินปั้นหลังเผา

รายการ	จำนวนชิ้น	วิธีการ	เครื่องมือ
การหดตัวเชิงเส้นหลังเผา	10	วัดระยะห่างของเครื่องหมายที่กำหนดไว้หลังเผาและนำไปเปรียบเทียบกับก่อนเผา	เวอร์เนียคาลิเปอร์
การดูดซึมน้ำ	10	ชั่งน้ำหนักชิ้นงานหลังเผา จากนั้นนำไปต้มในน้ำเดือดเป็นเวลา 5 ชั่วโมง แล้วทิ้งไว้ในน้ำอีก 24 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนักชิ้นงานเปรียบเทียบกับก่อนต้ม นำค่าที่ได้ไปคำนวณหาค่าการดูดซึมน้ำ (ดัดแปลงจากมาตรฐานการทดสอบ ASTM C373 – 88 (2006))	เครื่องชั่ง บีกเกอร์ แท่นให้ความร้อน
ความแข็งแรงต่อแรงดัด	10	ทดสอบความแข็งแรงของชิ้นงานที่ระยะ span length 8 เซนติเมตร (ดัดแปลงจากมาตรฐานการทดสอบ ASTM 674-88)	Universal Testing Machine (UTM)
องค์ประกอบทางแร่วิทยา	-	บดชิ้นงานหลังเผาและนำผงมาอัด	XRD
ค่าสี	3	วัดสีที่ผิวของกระเบื้อง	Color meter
การขยายตัวเนื่องจากความร้อน	1	วัดการเปลี่ยนแปลงความยาวระหว่างพิมอุณหภูมิของชิ้นงานทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 ซม. ยาว 2.5 ซม.	Dilatometer
ความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างเฉียบพลัน	10	ดูความเปลี่ยนแปลงของชิ้นงานเมื่อนำเข้า-ออกจากเตาที่ 200 องศาเซลเซียส 5 รอบ (ดัดแปลงจากมาตรฐานการทดสอบ ASTM C484 – 99 (2003))	เตาอบ
ความทนการรานสำหรับกระเบื้องมุงหลังคาเคลือบ	3	อัดความดันและให้ความร้อนกับกระเบื้องเคลือบ ตามมาตรฐาน มอก.2398 เล่ม 11-2553	Autoclave

1.8 แผนงานโครงการ

แผนการดำเนินงานของโครงการวิจัยตลอดระยะเวลา 1 ปี และขอขยายเวลาเพิ่มเติมอีก 3 เดือน

ขั้นตอน	ระยะเวลาดำเนินการ														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1) ศึกษาข้อมูล	→														
2) เตรียมส่วนผสม		→	→												
3) ขึ้นรูปชิ้นงานและเผา ในห้องปฏิบัติการ				→	→										
4) ตรวจสอบสมบัติและ วิเคราะห์ผล					→	→	→	→							
5) ทดลองผลิตในโรงงาน								→	→	→					
6) ฝึกอบรมและเผยแพร่ ผลงาน											→	→			
7) จัดทำรายงานและปิด โครงการ												→		→	→

หมายเหตุ : → คือ แผนงานที่วางเป้าหมายไว้ --→ คือ ดำเนินงานแล้ว

บทที่ 2

ผลการดำเนินงานวิจัย

บทที่ 2

ผลการดำเนินงานวิจัย

2.1 การศึกษาและวิเคราะห์สมบัติของวัตถุบดจากแหล่งที่เลือก

2.1.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุบดด้วยเทคนิค XRF ดังแสดงในตารางที่ 2.1 จะเห็นว่าดินเหนียวป่าโมก ดินเหนียวบ้านเบิก ดินเหนียวบ้านเบิก (lot No.2) (แหล่งใหม่) ดินเหนียวผักไห่ ดินเหนียวลำปาง และดินตำลานสกา เป็นดินที่มี SiO_2 ระหว่างร้อยละ 51 ถึง 62 โดยน้ำหนัก Al_2O_3 ร้อยละ 18 ถึง 27 โดยน้ำหนัก และสารช่วยลดอุณหภูมิการเผาทั้ง Na_2O K_2O CaO และ MgO รวมกันในระหว่างร้อยละ 3.7 ถึง 4.7 โดยน้ำหนัก สารให้สีในดินเหนียวได้แก่ Fe_2O_3 อยู่ระหว่างร้อยละ 4.7 ถึง 9.9 โดยน้ำหนัก นอกจากนี้ดินขาวระนองยังมี Al_2O_3 สูงถึงร้อยละ 32 โดยน้ำหนัก และในเฟลด์สปาร์มี Na_2O และ K_2O รวมร้อยละ 8.6 โดยน้ำหนัก รวมทั้งหินสบู่และหินผุซึ่งมีองค์ประกอบของ SiO_2 ร้อยละ 76 โดยน้ำหนัก Al_2O_3 ร้อยละ 16 โดยน้ำหนัก และมีสารช่วยลดอุณหภูมิการเผาเล็กน้อย ในขณะที่ควอตซ์มี SiO_2 ร้อยละ 98 โดยน้ำหนัก ส่วนเศษแก้วมีสูงถึงร้อยละ 61 โดยน้ำหนัก และมี CaO ด้วยถึงร้อยละ 9.27 โดยน้ำหนัก สำหรับค่าการสูญเสียน้ำหนักหลังเผาของวัตถุบดทุกชนิดมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 0.3 ถึง 21.4 โดยน้ำหนัก

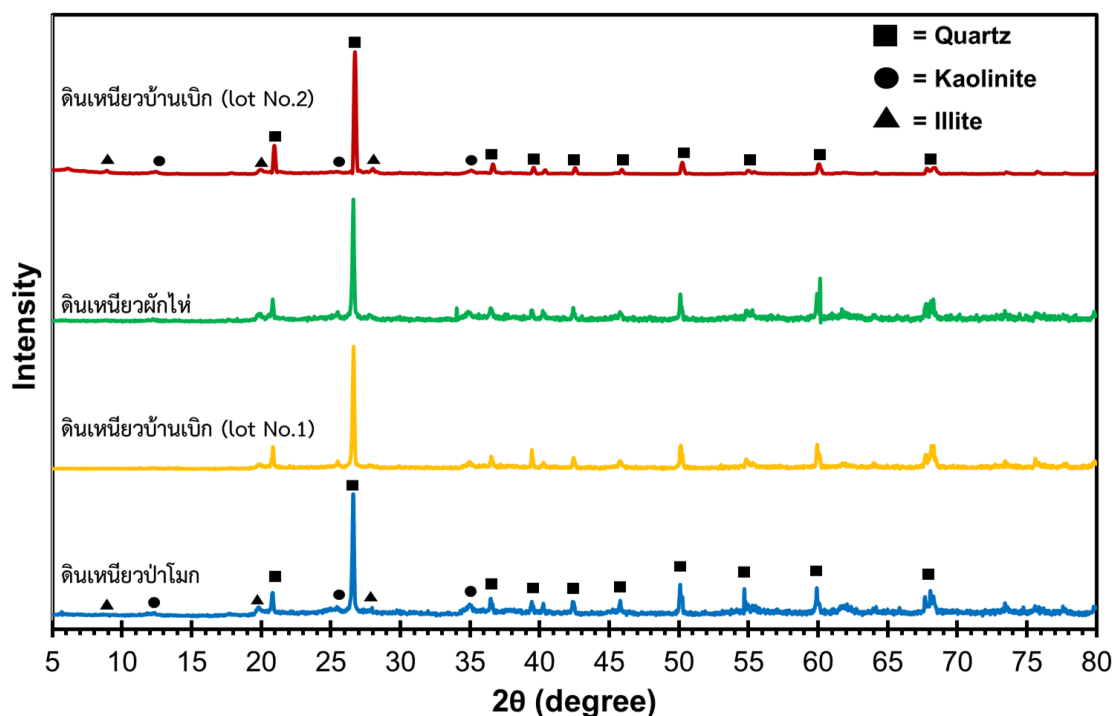
ตารางที่ 2.1 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ

วัตถุดิบ	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	MgO	LOI
ดินแดงท้องถิ่น									
- ดินเหนียวป่าโมก	21.55	51.43	5.47	0.85	0.23	2.18	0.72	1.12	16.44
- ดินเหนียวบ้าน เบิก (lot No.1)*	18.65	59.57	4.72	0.95	0.29	2.04	0.57	1.06	12.14
- ดินเหนียวบ้าน เบิก (lot No.2)*	19.30	61.70	5.49	0.94	0.44	2.21	0.64	1.41	7.46
- ดินเหนียวผักไห่	21.69	53.91	6.41	0.87	0.31	2.48	0.63	1.36	12.35
- ดินเหนียวลำปาง	21.83	52.04	9.95	0.95	0.38	2.35	0.44	0.99	11.07
ดินดาลานสกา	27.61	52.32	1.82	0.29	0.16	2.78	0.25	0.37	14.40
ดินดำ นครศรีธรรมราช	27.05	59.18	1.12	0.36	0.29	4.42	0.24	0.27	7.07
ดินขาวระนอง	32.38	42.21	1.19	0.06	0.08	2.43	0.06	0.13	21.45
เฟลด์สปาร์									
- K-feldspar	18.09	66.56	0.12	0.02	3.29	11.30	0.26	0.03	0.34
- Na-feldspar	17.63	68.51	0.41	0.25	8.81	0.75	1.42	0.78	1.43
ควอตซ์	0.18	98.81	0.10	0.05	0.30	0.07	0.10	0.10	0.30
หินสปู่	16.72	76.64	0.19	0.12	0.10	0.19	0.10	0.10	5.84
หินผุ	16.62	75.39	0.37	0.05	2.03	3.04	0.15	0.10	2.25
เศษแก้ว	1.10	61.39	0.37	0.11	10.75	0.31	9.27	4.04	12.66

*ดินที่ขุดจากแหล่งดินเดียวกันจำนวน 2 ครั้ง

2.1.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่วิทยา

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่วิทยาของดินเหนียวทั้งสามชนิดคือ ดินป่าโมก ดินบ้านเบิก (lot No.1) ดินผักไห่และดินบ้านเบิก (lot No.2) ด้วยเทคนิค XRD พบว่ามีองค์ประกอบทางแร่วิทยาเหมือนกันซึ่งได้แก่ Quartz Kaolinite และ Illite ดังแสดงในภาพที่ 2.1 โดยมีแนวโน้มที่จะนำมาใช้เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตกระเบื้องมุงหลังคาได้ รวมถึงมีโอกาสนำมาใช้ทดแทนกันได้



ภาพที่ 2.1 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD ของดินเหนียวทั้ง 4 แหล่ง

2.1.3 ผลการวิเคราะห์ปริมาณกากค้ำตะแกรงและขนาดอนุภาค

ผลการวิเคราะห์ปริมาณกากค้ำตะแกรงของดินเหนียวทั้ง 4 แหล่ง มีปริมาณกากที่ค้ำอยู่บนตะแกรงเบอร์ 325 เมช และผลวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของดินเหนียว ได้วิเคราะห์เพียง 3 แหล่ง โดยพิจารณาที่ค่ากลางการกระจายตัวขนาดอนุภาค (D_{50}) พบว่ามีค่าดังแสดงในตารางที่ 2.2 ซึ่งจะเห็นได้ว่าปริมาณกากค้ำตะแกรงเบอร์ 325 เมช ของดินเหนียวโดยเรียงจากค่ามากไปน้อยคือ ดินผักไห่ ดินบ้านเบ็ก (lot No.2) ดินบ้านเบ็ก (lot No.1) และดินป่าโมก โดยมีค่าร้อยละ 12.98 10.20 6.02 และ 5.85 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ส่วนค่ากลางการกระจายตัวขนาดอนุภาค (D_{50}) ของดินบ้านเบ็ก (lot No.2) ดินบ้านเบ็ก (lot No.1) และดินผักไห่ มีค่า 9.53 4.48 และ 3.23 ไมครอน ตามลำดับ

ตารางที่ 2.2 ผลวิเคราะห์ปริมาณกากค้ำตะแกรงและผลวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของดินเหนียว

สูตร	ปริมาณกากค้ำตะแกรง (%)	ค่ากลางการกระจายตัวขนาดอนุภาค (D_{50}) (μm)
ดินป่าโมก	5.85	-
ดินบ้านเบ็ก (lot No.1)	6.05	4.48
ดินผักไห่	12.98	3.23
ดินบ้านเบ็ก (lot No.2)	10.20	9.53

2.1.4 ผลการทดสอบเกลือซัลเฟตละลายน้ำ

ผลการทดสอบปริมาณเกลือซัลเฟตหรือ soluble salt ของดินเหนียวทั้ง 4 ชนิด แสดงดังตารางที่ 2.3 พบว่าดินป่าโมกมีปริมาณซัลเฟตมากที่สุดคือ 886.83 mg/kg รองลงมาคือดินผักไห่มีค่า 770.15 mg/kg และดินบ้านเบิก (lot No.2) มีค่า 583.66 mg/kg ส่วนดินบ้านเบิก (lot No.1) มีปริมาณซัลเฟตต่ำที่สุดคือ 176.99 mg/kg จากผลการทดสอบสามารถสรุปได้ว่าดินบ้านเบิกทั้ง 2 ชนิด อาจช่วยลดปัญหาการเกิดคลาบขาวบนกระเบื้องมุงหลังคาได้ โดยเฉพาะดินบ้านเบิก (lot No.1) และยังส่งผลให้เคลือบบนผิวกระเบื้องยึดติดได้ดี

ตารางที่ 2.3 ผลการทดสอบปริมาณซัลเฟตของดินเหนียว

สูตร	ปริมาณซัลเฟต (mg/kg)
ดินป่าโมก	886.83
ดินบ้านเบิก (lot No.1)	176.99
ดินผักไห่	770.15
ดินบ้านเบิก (lot No.2)	583.66

2.2 การพัฒนาสูตรเนื้อดินปั้น

2.2.1 การศึกษาสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมจากสูตรเนื้อดินปั้นโดยใช้ดินเหนียวป่าโมกเป็นวัตถุดิบหลัก

จากตารางที่ 2.4 แสดงปริมาณออกไซด์ในสูตรเนื้อดินที่มีดินเหนียวป่าโมกเป็นวัตถุดิบหลัก รวมทั้งสัดส่วนระหว่าง $Al_2O_3:SiO_2$ ส่วนตารางที่ 2.5 แสดงสมบัติของชิ้นงานก่อนเผา ประกอบด้วย ค่าการหดตัวและค่าความแข็งแรง พบว่าทุกสูตรมีค่าการหดตัวก่อนเผาระหว่างร้อยละ 3.7-7.5 และแนวโน้มสัมพันธ์กับค่าความแข็งแรงต่อแรงดัด ในขณะที่ค่าความแข็งแรงของชิ้นงานแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่มีค่าความแข็งแรง 4.0-5.8 เมกะพาสคัล และกลุ่มที่มีค่าความแข็งแรง 1.9-2.6 เมกะพาสคัล ทั้งนี้ผลการทดลองดังกล่าวเป็นผลจากปริมาณของวัสดุที่มีความเหนียวและความละเอียดสูง คือ สูตร P03 P06 P07 P08 และ P10 ซึ่งมีปริมาณดินเหนียวป่าโมกและดินดำลานสกาสูง นอกจากนี้บางสูตรยังมีควอตซ์น้อยกว่าสูตรอื่น ๆ แต่เมื่อมีปริมาณดินขาวเพิ่มขึ้นกลับส่งผลให้ความแข็งแรงก่อนเผาลดลงด้วย เนื่องจากขนาดอนุภาคใหญ่และความเหนียวน้อย ซึ่งเห็นได้ชัดเจนในสูตร P12 และ P13

ตารางที่ 2.4 ร้อยละ (%) ของปริมาณออกไซด์ในสูตรเนื้อดินปั้นที่ใช้ดินเหนียวป่าโมกเป็นวัตถุดิบหลัก

สูตร	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	MgO	Al ₂ O ₃ : SiO ₂
P01	21.95	67.63	3.43	0.52	1.52	2.26	1.53	1.16	0.325
P02	23.01	66.86	3.24	0.49	1.50	2.29	1.50	1.11	0.344
P03	23.30	66.24	3.19	0.48	1.54	2.80	1.40	1.06	0.352
P04	23.29	66.08	3.12	0.47	1.54	3.23	1.28	0.99	0.352
P05	22.98	66.11	3.02	0.46	1.61	3.65	1.22	0.95	0.348
P06	24.00	65.97	3.44	0.52	1.30	2.35	1.36	1.08	0.364
P07	24.23	65.64	3.39	0.51	1.26	2.78	1.20	1.00	0.369
P08	24.35	65.37	3.32	0.50	1.23	3.26	1.05	0.92	0.372
P09	24.02	65.51	3.19	0.48	1.26	3.77	0.93	0.84	0.367
P10	24.88	64.81	3.59	0.53	1.35	2.27	1.44	1.13	0.384
P11	25.01	64.54	3.44	0.50	1.37	2.77	1.31	1.05	0.388
P12	24.88	64.41	3.32	0.49	1.43	3.26	1.22	0.99	0.386
P13	24.76	64.77	3.26	0.48	1.21	3.78	0.90	0.84	0.382

ตารางที่ 2.5 สมบัติก่อนเผาของชิ้นงานที่เตรียมจากสูตรเนื้อดินปั้นโดยใช้ดินเหนียวป่าโมกเป็นวัตถุดิบหลัก

สูตร	การหดตัวเชิงเส้น (%)	ความแข็งแรงต่อแรงกด (MPa)
P01	6.47 (± 0.42)	2.63 (± 0.32)
P02	5.21 (± 1.35)	3.17 (± 0.25)
P03	5.66 (± 0.37)	5.84 (± 0.68)
P04	6.60 (± 0.56)	2.17 (± 0.22)
P05	5.42 (± 0.68)	2.43 (± 0.33)
P06	5.19 (± 0.56)	4.87 (± 0.60)
P07	5.18 (± 1.70)	4.75 (± 0.81)
P08	3.75 (± 1.59)	4.04 (± 0.35)
P09	6.56 (± 1.49)	2.24 (± 0.24)
P10	4.13 (± 1.45)	4.95 (± 0.69)
P11	3.94 (± 0.55)	2.60 (± 0.48)
P12	4.41 (± 1.21)	2.33 (± 0.34)
P13	7.53 (± 0.93)	1.84 (± 0.15)

จากตารางที่ 2.6 แสดงค่าการหดตัวหลังเผาของชิ้นงานหลังเผาที่ 1150 องศาเซลเซียส โดยค่าการหดตัวมีค่าระหว่างร้อยละ 10-13.2 ซึ่งเป็นค่าการหดตัวปกติของเนื้อดินปั้นสำหรับผลิตภัณฑ์กระเบื้อง นอกจากนี้ยังได้ทำการวัดค่าการโค้งตัว (sacking) ในบางสูตรหลังเผา พบว่ามีค่า 5-8 มิลลิเมตร ซึ่งถือว่าเป็นค่าที่รับได้สำหรับโรงงาน และเป็นค่าที่เหมาะสมในการนำไปใช้ผลิตกระเบื้องดินเผาungหลังคา

นอกจากนั้นยังพบว่าค่าการดูดซึมน้ำสูงสุดอยู่ที่ร้อยละ 4.59 และต่ำสุดอยู่ที่ร้อยละ 1.89 โดยผลของการดูดซึมน้ำจะขึ้นกับปริมาณ cullet เป็นหลัก รองลงคือปริมาณของ K_2O ในสูตรเกือบทุกสูตรที่ cullet สูงกว่า 7 จะมีค่าดูดซึมน้ำต่ำกว่า สูตรที่มีค่า cullet ต่ำกว่า 7 ยกเว้นสูตร P03 และ P04 ในขณะที่ปริมาณของ K_2O ก็ช่วยให้ลดค่าการดูดซึมน้ำเช่นกัน ดังผลในสูตร P07 และ P012 แม้ว่ามีปริมาณ Al_2O_3 สูงขึ้นและ cullet ลดลงเหลือร้อยละ 7 แต่ค่า K_2O ค่อนข้างสูง (ร้อยละ 2.36-2.47) แต่อย่างไรก็ตามในสูตรที่มี cullet ต่ำก็มักให้ค่าการดูดซึมน้ำสูงขึ้นซึ่งพบในสูตร P08 และ P13 สำหรับการใส่ cullet เป็นที่ทราบกันดีว่าช่วยให้เกิดเนื้อแก้วที่ช่วยลดความพรุนของผลิตภัณฑ์ แต่อย่างไรก็ตามปริมาณที่มากเกินไปก็จะทำให้ลดความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์ให้น้อยลง อย่างไรก็ตามทุกสูตรที่ได้พัฒนาขึ้นมีค่าการดูดซึมน้ำเพียงร้อยละ 1.9-4.6 ซึ่งต่ำกว่ามาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ซึ่งอยู่ที่ประมาณ ร้อยละ 13 (ค่าการดูดซึมน้ำของกระเบื้องดินเผาungหลังคาตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 158-2518)

เมื่อพิจารณาค่าความแข็งแรงหลังเผาของชิ้นงาน พบว่ามีค่าระหว่าง 35-43 เมกะพาสคัล ซึ่งทุกสูตรมีค่าสูงกว่าที่กำหนดในมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 158-2518 ที่กำหนดให้กระเบื้องดินเผาungหลังคามีค่า 7 เมกะพาสคัล เมื่อพิจารณาความแข็งแรงจะเห็นได้ว่าสูตร P02 P06 และ P07 อยู่ในกลุ่มที่มีค่าความแข็งแรงสูงกว่า 40 เมกะพาสคัล ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงของเนื้อดินเมื่อได้รับความร้อน และเมื่อพิจารณาปริมาณเศษแก้วเทียบกับเฟลสปาร์ พบว่าสูตรที่มีเศษแก้วมากจะมีความแข็งแรงสูงกว่า หากลดปริมาณเศษแก้วแล้วเพิ่มเฟลสปาร์แทนมีผลให้ความแข็งแรงลดลงซึ่งจะเห็นได้ดังสูตร P2-P5 P7 P8 และ P11-P13 และยังพบว่าหากเพิ่มปริมาณดินขาวจะมีผลทำให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้นตามไปด้วย อย่างไรก็ตามสูตรที่ไม่เติมเฟลสปาร์และลดปริมาณดินต่ำลงเช่นสูตร P10 ที่มีปริมาณดินขาวสูงถึงร้อยละ 27 ไม่มีฟลักซ์ช่วยในการเผาเนื้อที่ 1,150 องศาเซลเซียส จึงทำให้ไม่สุกตัวส่งผลให้ความแข็งแรงต่ำ

ตารางที่ 2.6 สมบัติหลังเผาที่อุณหภูมิ 1,150 องศาเซลเซียส ของชิ้นงานที่เตรียมจากสูตรเนื้อดินปั้นโดยใช้ดินเหนียวป่าโมกเป็นวัตถุดิบหลัก

สูตร	การหดตัวเชิงเส้น (%)	การดูดซึมน้ำ (%)	ความแข็งแรงต่อแรงดัด (MPa)
P01	13.20 (± 0.63)	1.92 (± 0.63)	38.49 (± 2.63)
P02	11.62 (± 1.35)	2.07 (± 0.69)	43.58 (± 3.08)
P03	12.00 (± 0.94)	3.74 (± 0.73)	38.79 (± 2.01)
P04	11.40 (± 0.55)	3.70 (± 0.43)	36.43 (± 2.77)
P05	11.70 (± 1.16)	2.75 (± 0.38)	36.80 (± 3.77)
P06	11.80 (± 0.63)	3.32 (± 0.38)	42.70 (± 5.60)
P07	13.20 (± 0.63)	2.81 (± 0.42)	42.58 (± 3.85)
P08	10.00 (± 0.82)	4.65 (± 0.33)	34.74 (± 1.59)
P09	9.58 (± 1.13)	2.77 (± 0.89)	41.05 (± 4.83)
P10	12.60 (± 1.71)	2.51 (± 0.50)	34.42 (± 2.49)
P11	12.20 (± 1.03)	2.35 (± 0.59)	38.30 (± 2.17)
P12	11.60 (± 0.52)	2.87 (± 0.36)	37.69 (± 2.35)
P13	12.30 (± 0.95)	4.15 (± 0.27)	36.00 (± 3.04)

จากการใช้ดินเหนียวป่าโมกผสมกับวัตถุดิบอื่น ๆ เพื่อพัฒนาสูตรเนื้อดิน 13 สูตร พบว่าทุกสูตรมีค่าความแข็งแรงสูงกว่าค่ามาตรฐานแต่ยังคงมีค่าการดูดซึมน้ำสูงกว่าเป้าหมายที่กำหนดไว้ นอกจากนั้นจะเห็นได้

ว่าสูตรที่มีสัดส่วนของ $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{SiO}_2$ ต่ำ และมี cullet ร้อยละ 10 รวมทั้งมีปริมาณดินดำ เฟลสปาร์และดินขาว ที่พอเหมาะส่งผลต่อค่าดูดซึมน้ำลดต่ำลงได้ ซึ่งจะได้ใช้เป็นแนวทางในปรับปรุงสูตรเพื่อลดการดูดซึมน้ำต่อไป

อย่างไรก็ตามในการวิจัยต่อมาเกิดปัญหาคือ เมื่อติดต่อขอซื้อดินมาพัฒนาให้ได้สูตรที่เหมาะสมและ ขยายผลเป็นผลิตภัณฑ์เชิงพาณิชย์พบว่าเจ้าของแหล่งดินไม่สามารถขายดินให้ได้ เนื่องจากมีปริมาณดินไม่ เพียงพอต่อความต้องการ จึงจำเป็นต้องหาดินแหล่งใหม่ในบริเวณจังหวัดใกล้เคียง

2.2.2 การศึกษาสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมจากสูตรเนื้อดินปั้นโดยใช้ดินเหนียวผักไถเป็นวัตถุดิบหลัก

สำหรับการออกแบบสูตรในครั้งนี้ ได้นำดินเหนียวผักไถมาศึกษาเพื่อเป็นวัตถุดิบหลักแทนดินเหนียว ป่าโมก ในการทดลองพบว่าดินเหนียวผักไถเป็นดินที่มีปริมาณ SiO_2 และ Al_2O_3 ใกล้เคียงกับดินเหนียวป่าโมก และมีองค์ประกอบทางแร่วิทยาที่ไม่แตกต่างกัน ทางผู้วิจัยจึงคาดว่าดินเหนียวผักไถสามารถนำมาใช้แทนดินเหนียวป่าโมกได้ ซึ่งจากการทดลองในส่วนที่ผ่านมาพบว่าสัดส่วนของ $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{SiO}_2$ ที่ต่ำ ส่งผลต่อค่าการดูดซึมน้ำและความแข็งแรงหลังเผา ดังนั้นในการทดลองนี้จึงมุ่งเน้นไปที่สูตรเนื้อดินปั้นที่มีสัดส่วนของ $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{SiO}_2$ ต่ำกว่า 0.300

ในส่วนของผลการทดลองโดยใช้ดินเหนียวผักไถเป็นวัตถุดิบหลักแสดงดังตารางที่ 2.7–2.10 โดยใน ตารางที่ 2.7 แสดงปริมาณออกไซด์ในสูตรเนื้อดินที่มีดินเหนียวผักไถเป็นวัตถุดิบหลัก รวมทั้งสัดส่วนระหว่าง $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{SiO}_2$ ที่ได้จากการคำนวณ ของสูตร PH+1 PH0 และ PH-1 ซึ่งเห็นได้ว่าทั้ง 3 สูตร มี $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{SiO}_2$ อยู่ ในช่วง 0.253-0.273

ตารางที่ 2.7 ร้อยละ (%) ของปริมาณออกไซด์ในสูตรเนื้อดินปั้นที่ใช้ดินเหนียวผักไถเป็นวัตถุดิบหลัก

สูตร	Al_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3	TiO_2	Na_2O	K_2O	CaO	MgO	$\text{Al}_2\text{O}_3:\text{SiO}_2$
PH+1	19.38	70.86	3.31	0.66	1.45	1.70	1.45	1.19	0.273
PH0	18.72	71.36	3.42	0.70	1.45	1.67	1.46	1.22	0.262
PH-1	18.18	71.89	3.41	0.70	1.47	1.67	1.46	1.22	0.253

ตารางที่ 2.8 แสดงค่าร้อยละการหดตัวและค่าความแข็งแรงต่อแรงดัดของชิ้นงานก่อนเผา พบว่า ชิ้นงานสูตร PH ซึ่งใช้ดินเหนียวผักไถเพียงอย่างเดียว มีค่าการหดตัวมากถึงร้อยละ 7.72 แต่เมื่อพิจารณาสูตร PH+1 PH0 และ PH-1 พบว่ามีค่าการหดตัวคือ ร้อยละ 4.9 5.2 และ 5.8 ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าที่น้อยกว่าดินปั้นที่ใช้ดินเหนียวผักไถเพียงชนิดเดียว เนื่องจากส่วนผสมอื่น ๆ ที่อยู่ในสูตรดินปั้นมีค่าการหดตัวน้อยกว่าค่าการหดตัวของดินเหนียวผักไถ และส่วนของค่าความแข็งแรงก่อนเผาพบว่าความแข็งแรงของชิ้นงานสูตร PH มี

ค่าใกล้เคียงกับสูตร PH-1 คือ 3.66 และ 5.57 เมกะพาสคัล ตามลำดับ ส่วนชิ้นงานสูตร PH+1 และ PH0 มีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก คือ 4.70 และ 4.41 เมกะพาสคัล ตามลำดับ โดยค่าความแข็งแรงก่อนเผาขึ้น เป็นผลมาจากการยึดเกาะกันของวัสดุที่มีความเหนียวและขนาดของวัสดุ เมื่อชิ้นงานแห้งจึงก่อให้เกิดความแข็งแรงขึ้นได้

ตารางที่ 2.8 สมบัติก่อนเผาของชิ้นงานที่เตรียมจากสูตรเนื้อดินปั้นโดยใช้ดินเหนียวผกให้เป็นวัสดุหลัก

สูตร	การหดตัวเชิงเส้น (%)	ความแข็งแรงต่อแรงดัด (MPa)
PH	7.72 (± 0.42)	3.66 (± 0.17)
PH+1	4.92 (± 0.29)	4.70 (± 0.45)
PH0	5.24 (± 0.49)	4.41 (± 0.72)
PH-1	5.81 (± 0.49)	3.57 (± 0.76)

ตารางที่ 2.9 แสดงร้อยละการหดตัว ค่าความแข็งแรงต่อแรงดัด และค่าการดูดซึมน้ำของชิ้นงานหลังเผาที่ 1,150 องศาเซลเซียส พบว่าสูตร PH PH+1 PH0 และ PH-1 มีค่าการหดตัวเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 6.7-9.0 ตามลำดับ ค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้นจาก 48-57 เมกะพาสคัล และยังพบว่าค่าการดูดซึมน้ำมีค่าลดลงจากร้อยละ 0.30-0.03 ซึ่งมีค่าเข้าใกล้ร้อยละ 0 แสดงให้เห็นว่าชิ้นงานสูตรดินปั้นทั้ง 4 สูตรสามารถสุกตัวได้ที่อุณหภูมิเผา 1,150 องศาเซลเซียส เป็นเช่นนี้เนื่องจากการที่ดินเหนียวผกใหม่มีปริมาณรวมของสารออกไซด์ที่เป็นตัวช่วยลดอุณหภูมิการเผาไหม้มาก โดยเฉพาะ K_2O ซึ่งอาจจะทำให้เนื้อดินปั้นสูตรที่ใช้ดินเหนียวผกให้เป็นวัสดุหลักเกิดการสุกตัวที่อุณหภูมิต่ำกว่าได้ โดยเฉพาะในสูตรที่มีสัดส่วนของ $Al_2O_3:SiO_2$ ที่ต่ำกว่า และส่งผลให้ค่าความแข็งแรงต่อแรงดัดของชิ้นงานหลังเผามีค่าสูงและสูงขึ้นเมื่อค่าการดูดซึมน้ำลดลง ซึ่งผลการทดลองทั้ง 3 ค่า มีความสอดคล้องกันอย่างมาก โดยเฉพาะสูตร PH+1 PH0 และ PH-1 คือเมื่อค่าการหดตัวมากขึ้นส่งผลให้ค่าการดูดซึมน้ำมีค่าลดลง และส่งผลต่อค่าความแข็งแรงต่อแรงดัดที่สูงขึ้น

ตารางที่ 2.9 สมบัติหลังเผาที่อุณหภูมิ 1,150 องศาเซลเซียสของชิ้นงานที่เตรียมจากสูตรเนื้อดินปั้นโดยใช้ดินเหนียวผกให้เป็นวัสดุหลัก

สูตร	การหดตัวเชิงเส้น (%)	การดูดซึมน้ำ (%)	ความแข็งแรงต่อแรงดัด (MPa)
PH	6.73 (± 0.14)	0.27 (± 0.31)	48.49 (± 4.91)
PH+1	7.84 (± 0.29)	0.39 (± 0.63)	48.04 (± 7.50)
PH0	8.60 (± 0.50)	0.10 (± 0.09)	53.57 (± 4.80)
PH-1	8.97 (± 0.53)	0.03 (± 0.10)	57.43 (± 6.21)

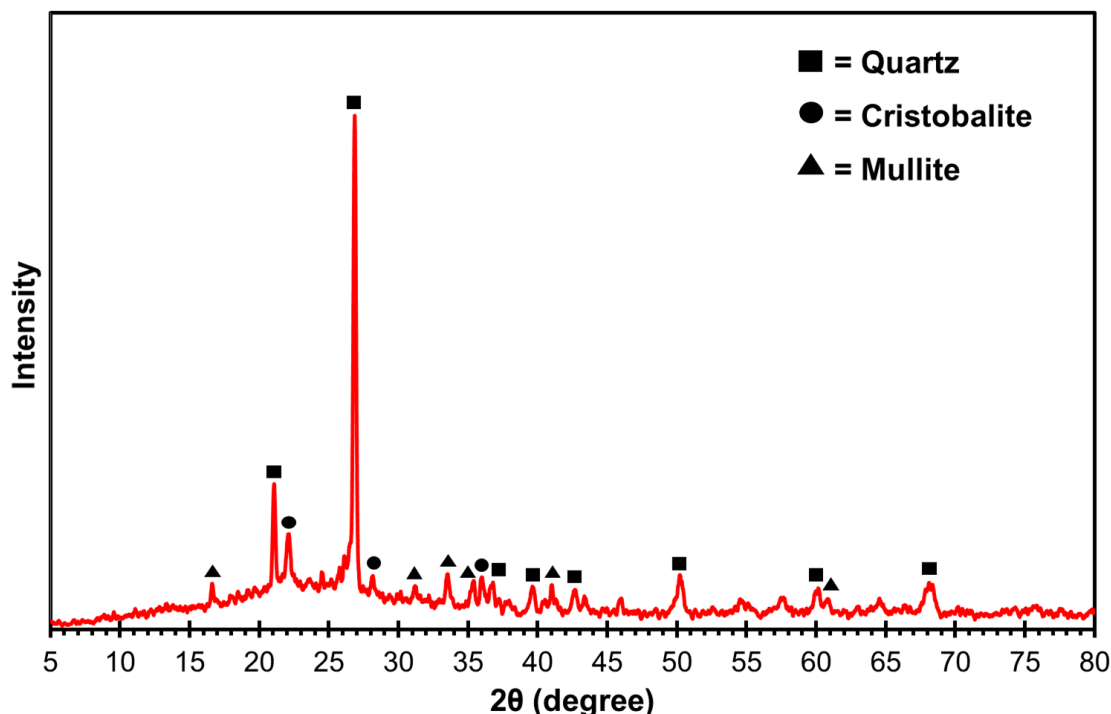
จากสมบัติของชิ้นงานเนื้อดินปั้นที่ใช้ดินเหนียวผกให้เป็นวัตถุดิบหลักหลังเผาที่อุณหภูมิ 1,150 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าที่เหมาะสมต่อการนำไปขยายผลต่อ ทางผู้วิจัยจึงต้องการศึกษาสมบัติของชิ้นงานหลังเผาที่อุณหภูมิเผาต่ำลง โดยเลือกศึกษาที่ 1,100 องศาเซลเซียส เพื่อหาแนวโน้มในการลดการใช้พลังงานในการผลิตกระเบื้องมุงหลังคา

จากการทดลองพบว่าค่าร้อยละการหดตัว ค่าความแข็งแรงต่อแรงดัด และค่าการดูดซึมน้ำของชิ้นงานหลังเผาที่ 1,100 องศาเซลเซียส แสดงดังตารางที่ 2.10 โดยค่าการหดตัวมีค่าเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 6.3-9.6 ค่าความแข็งแรงต่อแรงดัดมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 25-53 เมกะพาสคัล และค่าการดูดซึมน้ำมีค่าลดลงจากร้อยละ 1.9-0.09 ซึ่งเห็นได้ว่าชิ้นงานสูตร PH0 และ PH-1 มีค่าการดูดซึมน้ำเข้าใกล้ 0 แสดงให้เห็นว่าชิ้นงานทั้ง 2 สูตรสามารถสุกตัวได้ที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการที่ดินเหนียวผกให้มีปริมาณรวมของสารประกอบออกไซด์ที่เป็นตัวช่วยลดอุณหภูมิการเผามากกว่าดินป่าโมก โดยเฉพาะ K_2O ซึ่งอาจจะทำให้เนื้อดินปั้นสูตรที่ใช้ดินเหนียวผกให้เป็นวัตถุดิบหลักเกิดการสุกตัวที่อุณหภูมิต่ำกว่าได้ โดยเฉพาะในสูตรที่มีสัดส่วนของ $Al_2O_3:SiO_2$ ที่ต่ำกว่า

ตารางที่ 2.10 สมบัติหลังเผาที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียสของชิ้นงานที่เตรียมจากสูตรเนื้อดินปั้นโดยใช้ดินเหนียวผกให้เป็นวัตถุดิบหลัก

สูตร	การหดตัวเชิงเส้น (%)	การดูดซึมน้ำ (%)	ความแข็งแรงต่อแรงดัด (MPa)
PH	6.33 (± 0.36)	1.90 (± 0.66)	25.47 (± 7.80)
PH+1	7.40 (± 0.55)	1.41 (± 1.18)	53.26 (± 7.50)
PH0	8.16 (± 0.24)	0.21 (± 0.31)	52.95 (± 5.71)
PH-1	9.65 (± 1.16)	0.09 (± 0.15)	52.51 (± 4.90)

หลังจากนั้นจึงได้นำชิ้นงานสูตร PH-1 ซึ่งมีค่าการดูดซึมน้ำต่ำสุดมาวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ วิเคราะห์ แสดงดังภาพที่ 2.2 พบว่ามีองค์ประกอบของควอตซ์ คริสโตบาไลต์ และมัลไลต์ ซึ่งการมีมัลไลต์ในชิ้นงานส่งผลให้ความแข็งแรงมีค่าสูงขึ้น โดยมัลไลต์เกิดจากการทำปฏิกิริยาของดินที่เป็นส่วนผสมในสูตรดินปั้น



ภาพที่ 2.2 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD ของเนื้อดินปั้นสูตร PH-1 หลังเผาที่ 1,100 องศาเซลเซียส

จากผลการทดลองโดยใช้ดินผักไถ่เป็นวัตถุดิบหลักพบว่าชิ้นงานหลังเผาที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส มีสมบัติเบื้องต้นที่เหมาะสมต่อการนำไปพัฒนาต่อเป็นผลิตภัณฑ์เชิงพาณิชย์ได้ แต่เมื่อนำไปปรึกษากับผู้ผลิตกระเบื้องมุงหลังคา ทางผู้วิจัยได้รับข้อมูลว่าทางเจ้าของแหล่งดินได้แจ้งว่าดินผักไถ่ไม่มากพอที่จะนำมาแบ่งขายให้ในปริมาณมากได้ รวมทั้งราคาของดินที่สูงกว่าราคาดินจากแหล่งอื่น คือประมาณ 8,000 บาท ต่อตัน ทางผู้วิจัยจึงต้องแก้ปัญหาอีกครั้งด้วยการหาแหล่งดินใหม่

2.2.3 การศึกษาสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมจากสูตรเนื้อดินปั้นโดยใช้ดินเหนียวบ้านเบิกเป็น

วัตถุดิบหลัก

ในการทดลองนี้ได้ใช้ดินเหนียวจากแหล่งดินบ้านเบิก จังหวัดลพบุรี มาเป็นวัตถุดิบหลักทดแทนดินเหนียวผักไถ่ ซึ่งมีองค์ประกอบทางเคมีหลักไม่แตกต่างกันมากนัก โดยได้พัฒนาสูตรเนื้อดินปั้นทั้งหมด 4 สูตร ที่มีปริมาณออกไซด์ดังแสดงในตารางที่ 2.11 ซึ่งได้ควบคุมสัดส่วนของ $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{SiO}_2$ ของแต่ละสูตรให้ลดลงจาก 0.308 0.298 0.288 และ 0.278 ตามลำดับ เพื่อศึกษาผลของสัดส่วนของ $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{SiO}_2$ ต่อสมบัติเบื้องต้นของชิ้นงานหลังเผา

ตารางที่ 2.11 ร้อยละ (%) ของปริมาณออกไซด์ในสูตรเนื้อดินปั้นที่ใช้ดินเหนียวบ้านเบิกเป็นวัตถุดิบหลัก

สูตร	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	MgO	Al ₂ O ₃ :SiO ₂
LB0	21.13	68.59	3.44	0.67	1.49	2.01	1.47	1.21	0.308
LB-1	20.59	69.17	3.39	0.66	1.51	2.01	1.46	1.20	0.298
LB-2	20.05	69.54	3.49	0.69	1.51	2.01	1.48	1.22	0.288
LB-3	19.45	69.96	3.61	0.72	1.52	2.00	1.49	1.25	0.278

โดยในการทดลองเบื้องต้นได้พิจารณาเนื้อดินปั้นสูตร LB0 และ LB-1 ผลการทดลองดังตารางที่ 2.12 แสดงร้อยละการหดตัวและค่าความแข็งแรงต่อแรงดัด โดยเปรียบเทียบกับสูตร LB ซึ่งใช้ดินเหนียวบ้านเบิกเพียงอย่างเดียว พบว่ามีค่าการหดตัวมากถึงร้อยละ 7.1 แต่เมื่อพิจารณาสูตร LB0 และ LB-1 ซึ่งเป็นสูตรที่นำดินเหนียวบ้านเบิกมาผสมกับวัตถุดิบชนิดอื่น ๆ เพื่อปรับปรุงสมบัติต่าง ๆ พบว่ามีค่าการหดตัวคือ ร้อยละ 1.99 และ 3.36 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าลดลงจากสูตร LB อย่างชัดเจน ส่วนค่าความแข็งแรงพบว่าสูตร LB LB0 และ LB-1 มีค่าความแข็งแรงลดลงจาก 4.19 3.73 และ 3.60 เมกะพาสคัล ตามลำดับ เนื่องจากปริมาณดินเหนียวในส่วนผสมลดลง ส่งผลให้วัสดุที่ทำหน้าที่ช่วยยึดเกาะของชิ้นงานก่อนเผามีปริมาณน้อยลง

ตารางที่ 2.12 สมบัติก่อนเผาของชิ้นงานที่เตรียมจากสูตรเนื้อดินปั้นโดยใช้ดินเหนียวบ้านเบิกเป็นวัตถุดิบหลัก

สูตร	การหดตัวเชิงเส้น (%)	ความแข็งแรงต่อแรงดัด (MPa)
LB	7.15 (±0.40)	4.19 (±0.27)
LB0	1.99 (±0.96)	3.73 (±0.67)
LB-1	3.36 (±1.42)	3.60 (±0.73)

ในการทดสอบชิ้นงานหลังเผาเบื้องต้นได้พิจารณาเพียงสูตร LB0 และ LB-1 โดยเผาที่อุณหภูมิ 1,150 องศาเซลเซียส และเทียบกับสูตร LB ผลการทดลองดังตารางที่ 2.13 แสดงร้อยละการหดตัว ค่าการดูดซึมน้ำ และค่าความแข็งแรงของชิ้นงานหลังเผาที่ 1,150 พบว่าสูตร LB LB0 และ LB-1 มีค่าการหดตัวหลังเผาเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 4.75 8.87 และ 9.24 ตามลำดับ และยังพบว่าค่าการดูดซึมน้ำของชิ้นงานสูตร LB0 และ LB-1 มีค่าร้อยละ 0.10 และ 0.04 ซึ่งเข้าใกล้ร้อยละ 0 และแตกต่างจากสูตร LB อย่างชัดเจน ซึ่งสอดคล้องกับค่าการหดตัวเชิงเส้นหลังเผา เนื่องจากสูตรเนื้อดินปั้น LB0 และ LB-1 มีการเติมส่วนผสมของฟลักซ์เข้าไปในเนื้อดิน ส่งผลให้ช่วยลดอุณหภูมิสุกตัวของชิ้นงานได้ ยิ่งไปกว่านั้นเมื่อพิจารณาค่าความแข็งแรงพบว่าสูตร LB LB0 และ LB-1 มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 39.52 48.78 และ 50.55 เมกะพาสคัล ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับค่าการหดตัว

และการดูดซึมน้ำหลังเผา แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิ 1,150 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิที่ทำให้เกิดการสุกตัวของสูตรเนื้อดินได้ดี เนื่องจากสัดส่วนของ $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{SiO}_2$ ที่ลดลง โดยเฉพาะสูตรที่มีสัดส่วนของ $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{SiO}_2$ น้อยที่สุด นอกจากนี้ยังได้ทำการวัดค่าการโค้งตัว (sacking) หลังเผาที่อุณหภูมิ 1,150 องศาเซลเซียส พบว่ามีค่า 5.5 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นค่าที่โรงงานยอมรับได้และเป็นค่าที่เหมาะสมในการนำไปใช้ผลิตกระเบื้องดินเผาung หลังคา

ตารางที่ 2.13 สมบัติหลังเผาที่อุณหภูมิ 1,150 องศาเซลเซียส ของชิ้นงานที่เตรียมจากสูตรเนื้อดินปั้นโดยใช้ดินเหนียวบ้านเบิกเป็นวัตถุดิบหลัก

สูตร	การหดตัวเชิงเส้น (%)	การดูดซึมน้ำ (%)	ความแข็งแรงต่อแรงดัด (MPa)
LB	4.75 (± 0.11)	7.03 (± 0.38)	39.52 (± 2.80)
LB0	8.87 (± 0.92)	0.10 (± 0.16)	48.78 (± 7.45)
LB-1	9.24 (± 1.31)	0.04 (± 0.10)	50.55 (± 6.68)

หลังจากนั้นทางผู้วิจัยได้ศึกษาสมบัติของชิ้นงานสูตร LB LB0 และ LB-1 หลังเผาที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส ด้วยเหตุผลเช่นเดียวกับการทดลองที่ผ่านมา ในการทดลองชิ้นงานหลังเผามีผลการทดลองดังตารางที่ 2.14 แสดงร้อยละการหดตัว ค่าการดูดซึมน้ำ และค่าความแข็งแรงของชิ้นงานหลังเผาที่ 1,100 พบว่าสูตร LB LB0 และ LB-1 มีค่าการหดตัวหลังเผาเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 4.17 7.41 และ 6.36 ตามลำดับ ค่าการดูดซึมน้ำของชิ้นงานมีค่าร้อยละ 8.27 9.31 และ 11.30 ยิ่งไปกว่านั้นเมื่อพิจารณาค่าความแข็งแรงพบว่าสูตร LB LB0 และ LB-1 มีค่า 18.61 35.13 และ 33.22 เมกะพาสคัล ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิที่ไม่สามารถทำให้เกิดการสุกตัวของสูตรเนื้อดินปั้นได้

ตารางที่ 2.14 สมบัติหลังเผาที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียสของชิ้นงานที่เตรียมจากสูตรเนื้อดินปั้นโดยใช้ดินเหนียวบ้านเบิกเป็นวัตถุดิบหลัก

สูตร	การหดตัวเชิงเส้น (%)	การดูดซึมน้ำ (%)	ความแข็งแรงต่อแรงดัด (MPa)
LB	4.17 (± 0.09)	8.27 (± 0.53)	18.61 (± 2.09)
LB0	7.41 (± 0.57)	9.31 (± 0.63)	35.13 (± 2.08)
LB-1	6.36 (± 0.36)	11.30 (± 0.63)	33.22 (± 2.26)

ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงได้พัฒนาสูตรดินปั้นเพิ่มขึ้นอีก 2 สูตร โดยลดสัดส่วนของ $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{SiO}_2$ ลงจากสูตร LB0 และ LB-1 เพื่อต้องการชิ้นงานที่สุกตัวได้เมื่อเผาที่ 1,100 องศาเซลเซียส โดยกำหนดให้มีชื่อสูตรเป็น LB-2 และ LB-3 มีปริมาณออกไซด์และสัดส่วนของ $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{SiO}_2$ ดังตารางที่ 2.11

ผลการทดสอบสมบัติก่อนเผาของชิ้นงานสูตร LB-2 และ LB-3 แสดงดังตารางที่ 2.15 พบว่าค่าการหดตัวก่อนเผามีค่าร้อยละ 4.04 และ 4.50 ตามลำดับ และมีค่าความแข็งแรงต่อแรงดัด 2.50 และ 2.18 เมกะพาสคัล ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าค่าการหดตัวก่อนเผาของชิ้นงานสูตร LB-2 และ LB-3 มีค่าสูงกว่าสูตร LB0 และ LB-1 จากการทดลองก่อนหน้านี้ เนื่องจากทั้ง 2 สูตร มีการใช้ปริมาณดินเหนียวบ้านเบิกเพิ่มขึ้น แต่มีค่าความแข็งแรงที่ลดน้อยลง

ตารางที่ 2.15 สมบัติก่อนเผาของชิ้นงานที่เตรียมจากสูตรเนื้อดินปั้นโดยใช้ดินเหนียวบ้านเบิกเป็นวัตถุดิบหลัก

สูตร	ร้อยละการหดตัว เชิงเส้น (%)	ความแข็งแรงต่อแรงดัด (MPa)
LB-2	4.04 (± 0.19)	2.50 (± 0.24)
LB-3	4.50 (± 0.25)	2.18 (± 0.19)

จากตารางที่ 2.16 แสดงผลการทดลองของชิ้นงานสูตร LB-2 และ LB-3 หลังเผาที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส พบว่าชิ้นงานสูตร LB-2 และ LB-3 มีค่าการหดตัวอยู่ที่ร้อยละ 7.74 และ 7.98 ตามลำดับ ค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ 5.75 และ 5.46 และค่าความแข็งแรงต่อแรงดัด 27.03 และ 24.77 เมกะพาสคัล ตามลำดับ ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่าค่าการดูดซึมน้ำของชิ้นงานทั้ง 2 สูตร มีค่าลดลงจากสูตร LB0 และ LB-1 หลังเผาที่ 1,100 องศาเซลเซียส อย่างชัดเจน เนื่องจากสูตร LB-2 และ LB-3 มีส่วนสัดส่วนของ $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{SiO}_2$ ที่ลดลง และมีผสมของดินเหนียวบ้านเบิกมากขึ้น รวมทั้งมีปริมาณฟลักซ์เพิ่มขึ้นด้วย แต่อย่างไรก็ตามการดูดซึมน้ำของชิ้นงานยังคงมีค่าสูงกว่าค่าเป้าหมาย

ตารางที่ 2.16 สมบัติหลังเผาที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียสของชิ้นงานที่เตรียมจากสูตรเนื้อดินปั้นโดยใช้ดินเหนียวบ้านเบิกเป็นวัตถุดิบหลัก

สูตร	การหดตัวเชิงเส้น (%)	การดูดซึมน้ำ (%)	ความแข็งแรงต่อแรงดัด (MPa)
LB-2	7.74 (± 0.28)	5.75 (± 0.77)	27.03 (± 3.13)
LB-3	7.98 (± 0.32)	5.46 (± 0.48)	24.77 (± 4.43)

จากผลการทดลองการใช้ดินเหนียวบ้านเบิกมาใช้เป็นวัตถุดิบหลักในการเตรียมสูตรเนื้อดินปั้นสามารถสรุปได้ว่าสูตรที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งานคือสูตร LB-1 และอุณหภูมิเผาขึ้นงานที่เหมาะสมคือ 1,150 องศาเซลเซียส เนื่องจากเป็นสูตรที่มีความแข็งแรงหลังเผาสูงที่สุดและมีค่าการดูดซึมน้ำต่ำที่สุด

2.2.4 การขยายผลในโรงงานกระเบื้องดินเผาungหลังกา CVB

ในการทดลองส่วนนี้ได้นำดินปั้นสูตร LB-1 มาขยายผลในโรงงานกระเบื้องungหลังกา CVB เนื่องจากดินเหนียวบ้านเบิกที่ได้รับมามีปริมาณไม่เพียงพอต่อการนำมาขยายผล จึงได้นำดินที่ได้รับรื้อรอบใหม่มาใช้ทดแทน โดยกำหนดให้มีชื่อว่าดินเหนียวบ้านเบิก (lot No.2) ซึ่งก่อนจะนำไปขยายผลในโรงงาน ทางผู้วิจัยจำเป็นต้องนำดินเหนียวบ้านเบิก (lot No.2) มาวิเคราะห์ทดสอบสมบัติอีกครั้งเพื่อยืนยันถึงความสม่ำเสมอของดินในแหล่ง และนำมาใช้เป็นวัตถุดิบหลักในการเตรียมสูตรเนื้อดินปั้นสูตร LB-1 โดยได้กำหนดชื่อสูตรเป็น NLB-1 และมีสัดส่วนของ $Al_2O_3:SiO_2$ เท่ากับ 0.298 เช่นเดิม โดยผลการวิเคราะห์ปริมาณออกไซด์ของสูตร NLB-1 แสดงดังตารางที่ 2.17 จากผลการวิเคราะห์พบว่ามีปริมาณออกไซด์ชนิดต่าง ๆ ใกล้เคียงกับดินเดิม เมื่อนำดินมาผสมเป็นเนื้อดินปั้นสูตร NLB-1 และนำไปทดสอบความเหนียวหรือ Plasticity พบว่าที่ความชื้นมีผลต่อค่าการยุบตัวของดินปั้น โดยเมื่อมีความชื้นประมาณร้อยละ 23 จะมีค่าความสูงของแท่งดินก่อนทดสอบต่อหลังทดสอบ (H_0/H_f) เฉลี่ยอยู่ที่ 2.86 ซึ่งเป็นค่าที่ชี้ว่าเนื้อดินปั้นมีความเหนียว

ตารางที่ 2.17 ร้อยละ (%) ของปริมาณออกไซด์ในสูตรเนื้อดินปั้นที่ใช้ดินเหนียวบ้านเบิก (lot No.2) เป็นวัตถุดิบหลัก

สูตร	Al_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3	TiO_2	Na_2O	K_2O	CaO	MgO	$Al_2O_3 : SiO_2$
NLB-1	20.59	69.17	3.39	0.66	1.51	2.01	1.46	1.20	0.298

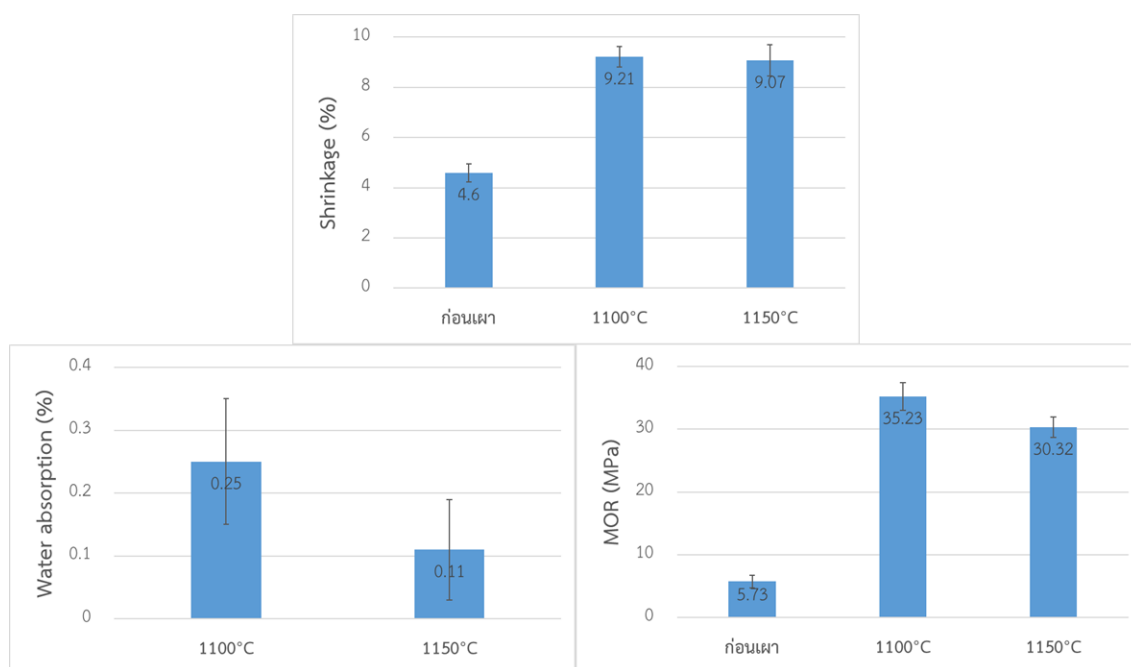
เมื่อนำชิ้นงานสูตร NLB-1 ที่ขึ้นรูปมาศึกษาสมบัติก่อนเผา ได้ผลแสดงดังตารางที่ 2.18 จากผลการทดลองพบว่าการหดตัวมีค่าร้อยละ 4.60 และความแข็งแรงต่อแรงดัดมีค่า 5.73 เมกะพาสคัล เมื่อพิจารณาสมบัติหลังเผาที่อุณหภูมิ 1,100 และ 1,150 องศาเซลเซียส ดังแสดงในตารางที่ 2.19 และภาพที่ 2.3 พบว่าการหดตัวหลังเผามีค่าร้อยละ 9.21 และ 9.07 ตามลำดับ ค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ 0.25 และ 0.11 ตามลำดับ และค่าความแข็งแรงต่อแรงดัด 35.23 และ 30.32 เมกะพาสคัล ตามลำดับ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าชิ้นงานสูตร NLB-1 สามารถสุกตัวได้โดยการเผาที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส และเมื่อเผาที่อุณหภูมิ 1,150 องศาเซลเซียส พบว่าความแข็งแรงมีค่าลดลง ในขณะที่การดูดซึมน้ำมีค่าลดลงเช่นกัน ซึ่งหมายถึงการเกิดเนื้อแก้วเพิ่มขึ้นในชิ้นงาน ซึ่งเนื้อแก้วนั้นเป็นผลทำให้ความแข็งแรงลดลง แต่อย่างไรก็ตามยังเห็นได้ว่าความแข็งแรงยังคงมีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐาน

ตารางที่ 2.18 สมบัติก่อนเผาของชิ้นงานที่เตรียมจากสูตรเนื้อดินปั้น NLB-1

สูตร	การหดตัวเชิงเส้น (%)	ความแข็งแรงต่อแรงกด (MPa)
NLB-1	4.60 (± 0.36)	5.73 (± 1.03)

ตารางที่ 2.19 สมบัติหลังเผาที่อุณหภูมิ 1,100 และ 1,150 องศาเซลเซียส ของชิ้นงานที่เตรียมจากสูตรเนื้อดินปั้น NLB-1

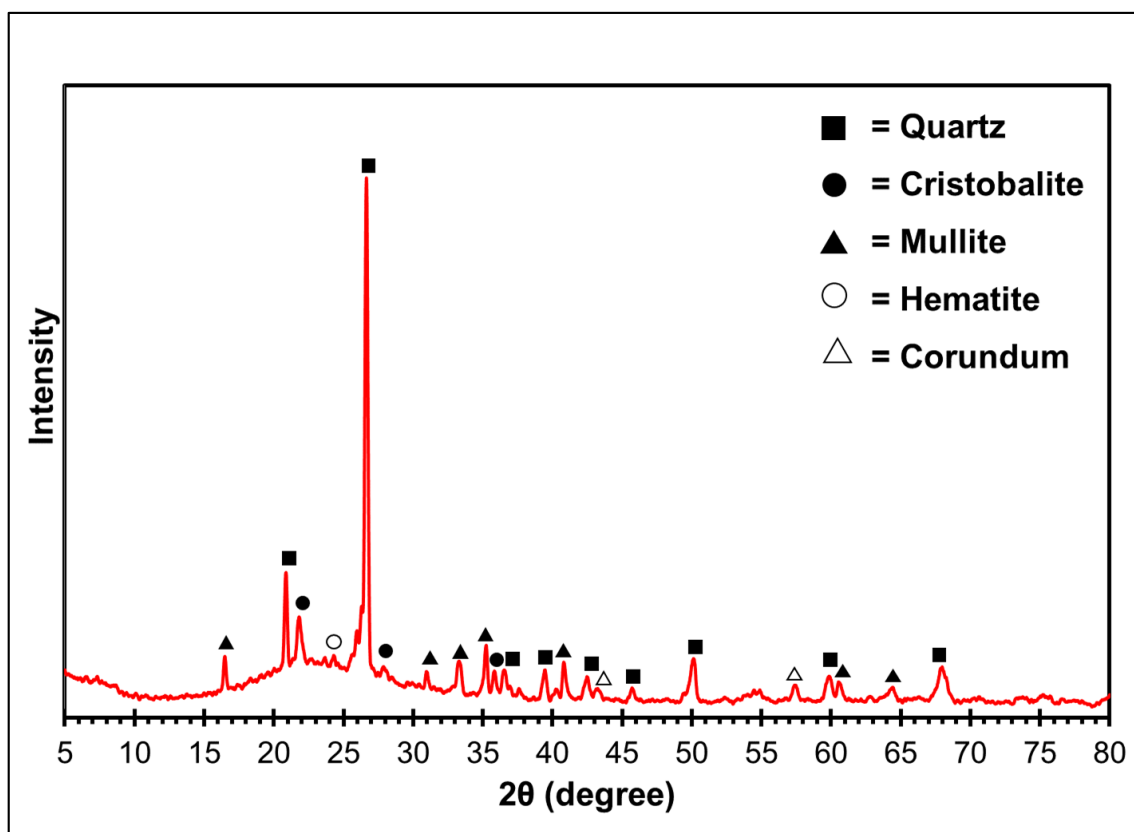
อุณหภูมิเผา ($^{\circ}\text{C}$)	การหดตัวเชิงเส้น (%)	การดูดซึมน้ำ (%)	ความแข็งแรงต่อแรงกด (MPa)
1,100	9.21 (± 0.41)	0.25 (± 0.10)	35.23 (± 2.18)
1,150	9.07 (± 0.62)	0.11 (± 0.08)	30.32 (± 1.62)



ภาพที่ 2.3 สมบัติก่อนและหลังเผาที่อุณหภูมิ 1,100 และ 1,150 องศาเซลเซียส ของชิ้นงานที่เตรียมจากสูตรเนื้อดินปั้น NLB-1

แต่เนื่องจากทางโรงงานต้องการเผาชิ้นงานที่อุณหภูมิที่ใช้งานตามปกติคือ 1,150 องศาเซลเซียส ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงต้องเลือกพิจารณาองค์ประกอบทางแร่วิทยาของชิ้นงานสูตร NLB-1 หลังเผาที่อุณหภูมิ 1,150 องศาเซลเซียส เท่านั้น เพื่อให้สอดคล้องกับความต้องการของโรงงาน ผลการวิเคราะห์แสดงดังภาพที่ 2.4 พบว่ามีองค์ประกอบของควอตซ์ คริสโตบาไลต์ และมัลไลต์ นอกจากนั้นยังพบฮีมาไทต์ และคอร์ันดัม

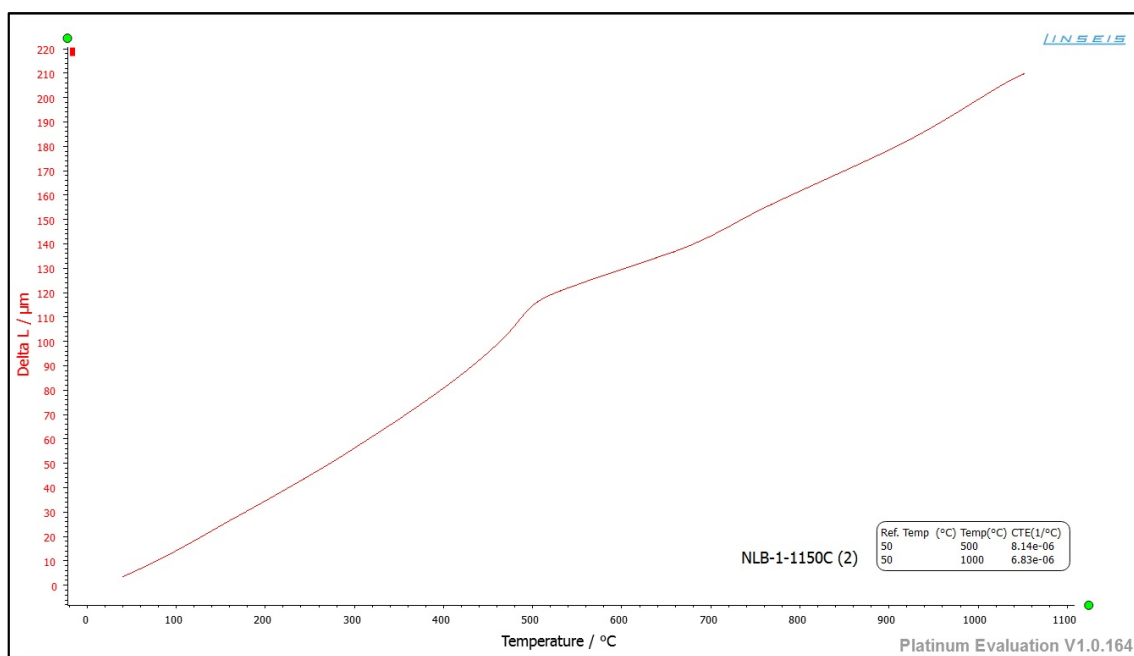
เล็กน้อย ซึ่งการมีมัลไลต์ในชิ้นงานส่งผลให้ความแข็งแรงมีค่าสูงขึ้น โดยมัลไลต์เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยาของดินที่เป็นส่วนผสมในสูตรดินปั้น ซึ่งเป็นไปตามกรอบแนวคิดของโครงการและเฟสไดอะแกรมในภาพที่ 1.2 ส่วนคริสโตบาไลต์เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนเฟสของควอตซ์ที่อุณหภูมิสูง นอกจากนั้นเมื่อพิจารณาปริมาณของผลิตภัณฑ์และออสันฐานด้วยการคำนวณพื้นที่ใต้แผนภาพพบว่าปริมาณผลิตภัณฑ์อยู่ร้อยละ 55 และปริมาณออสันฐานอยู่ร้อยละ 45 แสดงให้เห็นว่าเกิดเนื้อแก้วขึ้นในชิ้นงานหลังเผาที่อุณหภูมิ 1,150 องศาเซลเซียส ซึ่งสอดคล้องกับค่าความแข็งแรงที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น และเมื่อวิเคราะห์เชิงปริมาณของแร่แต่ละชนิดที่อยู่ในรูปผลิตภัณฑ์ด้วยเทคนิค Rietveld ด้วยโปรแกรม TOPAS พบว่าควอตซ์ร้อยละ 26.73 คริสโตบาไลต์ร้อยละ 4.43 มัลไลต์ร้อยละ 16.23 ฮีมาไทต์ร้อยละ 2.32 และคอร์ันดัมร้อยละ 5.77



ภาพที่ 2.4 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD ของเนื้อดินปั้นสูตร NLB-1 หลังเผาที่ 1,150 องศาเซลเซียส

เมื่อพิจารณาสมบัติทางความร้อนของชิ้นงานพบว่าค่าการขยายตัวทางความร้อนของชิ้นงานในช่วงอุณหภูมิ 50-400 องศาเซลเซียส มีค่า 7.12×10^{-6} ต่อองศาเซลเซียส เมื่อทดสอบค่าความต้านต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างเฉียบพลันที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส และตรวจสอบจากการแตกร้าวของชิ้นงานหลังการทดสอบด้วยการแช่สีย้อมและร้อยละค่าความแข็งแรงของกระเบื้องที่ลดลงหลังผ่านการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างเฉียบพลัน พบว่าหลังการทดสอบไม่พบรอยแตกที่ผิวของชิ้นงาน และมีค่าความแข็งแรงของกระเบื้องลดลงเป็น 27.11 เมกะพาสคัล คิดเป็นร้อยละ 10.59 ซึ่งค่าความแข็งแรงดังกล่าวยังคงสูงกว่าค่ามาตรฐานในมอก. 158-2518 แสดงให้เห็นว่าชิ้นงานสูตร NLB-1 หลังเผาที่ 1,150 องศาเซลเซียส มี

ความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างเฉียบพลันที่ 200 องศาเซลเซียส ซึ่งสอดคล้องกับกราฟการขยายตัวเนื่องจากความร้อนในภาพที่ 2.5 โดยเมื่อสังเกตที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส พบว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงความชื้นเนื่องจากการขยายตัวของเฟสคลิสโตบาไลต์ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลดังที่ได้กล่าวไว้ในภาพที่ 1.4 อีกทั้งค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวในช่วง 50-200 องศาเซลเซียส มีค่าไม่สูงมาก (6.43×10^{-6} ต่อองศาเซลเซียส) ประกอบกับกระเบื้องมีความแข็งแรงมากขึ้นจากการเกิดขึ้นของมัลไลต์ จึงมีความทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลันได้มากขึ้น



ภาพที่ 2.5 ผลวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนเนื้อดินปั้นสูตร NLB-1

แต่เมื่อนำเนื้อดินปั้นสูตร NLB-1 ไปเข้าสู่กระบวนการผลิตในโรงงานพบว่าไม่สามารถขึ้นรูปชิ้นงานได้ เนื่องจากความเหนียวของเนื้อดินปั้นยังไม่เหมาะสมต่อการขึ้นรูปด้วยวิธีนี้ ทางผู้วิจัยและโรงงานจึงได้ปรับปรุงสูตรเนื้อดินปั้นให้มีความสามารถในการขึ้นรูปให้ดีขึ้น โดยการเติมดินด้านครีธรรมราชเข้าไปในสูตร NLB-1 เพื่อเพิ่มความเหนียวให้กับส่วนผสมของเนื้อดินปั้น ส่งผลให้สามารถขึ้นรูปได้ และเรียกสูตรดินปั้นนี้ว่า NLB-1+B มีส่วนผสมดังตารางที่ 2.20 และมีปริมาณออกไซด์ใกล้เคียงกับสูตร NLB-1 และสัดส่วนของ $Al_2O_3:SiO_2$ แสดงดังตารางที่ 2.21 ซึ่งมีค่าเท่ากับของสูตร NLB-1 เช่นกัน

ตารางที่ 2.20 ร้อยละ (%) โดยน้ำหนักของวัตถุดิบในสูตรเนื้อดินปั้น NLB-1+B

สูตร	วัตถุดิบ				
	ดินเหนียว บ้านเบิก (lot No.2)	ดินขาว ระนอง	ดินดำ นครศรีธรรมราช	ควอตซ์	เศษแก้ว
NLB-1+B	49.00	21.60	6.90	12.50	10.00

ตารางที่ 2.21 ร้อยละ (%) ของปริมาณออกไซด์ในสูตรเนื้อดินปั้น NLB-1+B

สูตร	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	MgO	Al ₂ O ₃ :SiO ₂
NLB-1+B	20.69	69.48	3.08	0.59	1.47	2.13	1.43	1.12	0.298

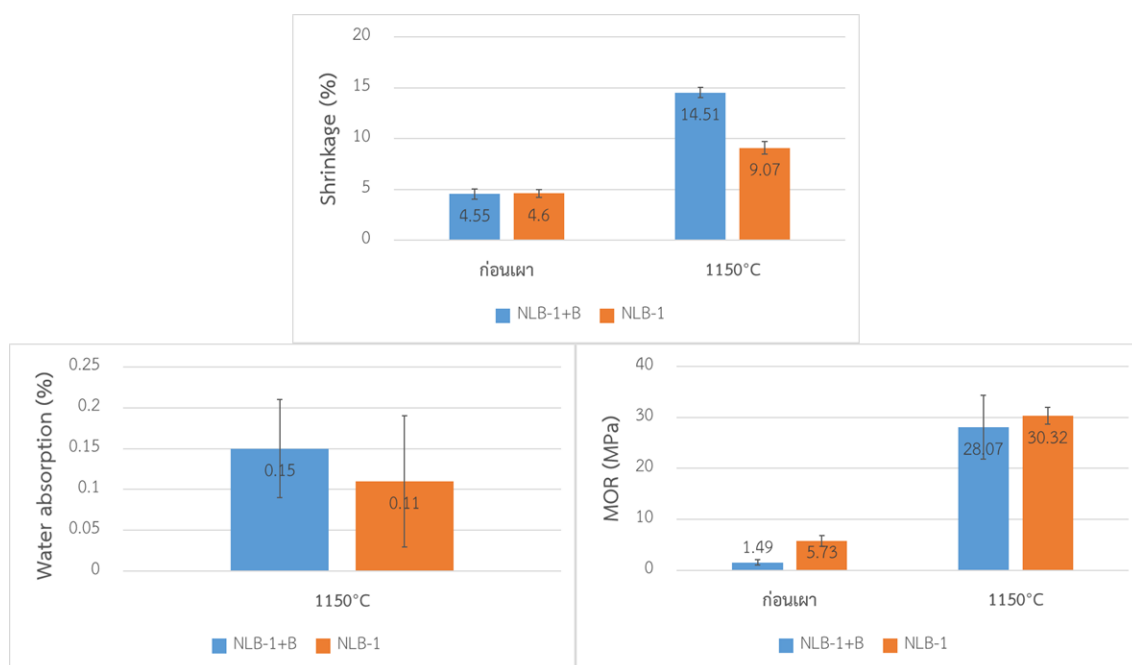
ตารางที่ 2.22 และ 2.23 และภาพที่ 2.6 แสดงสมบัติก่อนและหลังเผาของชิ้นงานสูตร NLB-1+B จากผลการทดลองพบว่าการหดตัวก่อนเผามีค่าร้อยละ 4.55 ซึ่งใกล้เคียงกับสูตร NLB-1 ในขณะที่ความแข็งแรงต่อแรงดัดมีค่าลดลงเหลือ 1.49 เมกะพาสคัล อาจเนื่องจากการเปลี่ยนวัตถุดิบบางชนิด อย่างไรก็ตามชิ้นงานก่อนเผายังคงมีความแข็งแรงพอเหมาะต่อการทำงาน และเมื่อเผาชิ้นงานที่อุณหภูมิ 1,150 องศา พบว่ามีค่าการหดตัวหลังเผาร้อยละ 14.51 ซึ่งมากกว่าสูตร NLB-1 เนื่องจากการเติมเนื้อดินดำซึ่งมีเนื้อละเอียด และลดเฟลสปาร์ซึ่งเป็นสารในกลุ่ม non plastic ลง แต่ค่าความแข็งแรงต่อแรงดัดมีค่า 28.07 เมกะพาสคัล และค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ 0.15 ซึ่งไม่ได้แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ จากผลการทดสอบพบว่าเนื้อดินปั้นสูตร NLB-1+B หลังเผามีค่าความแข็งแรงดัดสูงและมีค่าการดูดซึมน้ำที่ต่ำกว่าร้อยละ 1 แสดงให้เห็นว่าเนื้อดินปั้นสามารถสุกตัวได้หลังเผาที่อุณหภูมิ 1,150 องศาเซลเซียส เนื่องจากมีปริมาณสารช่วยลดการสุกตัวสูง (Na₂O และ K₂O) และมีสัดส่วนของ Al₂O₃:SiO₂ ที่เหมาะสม

ตารางที่ 2.22 สมบัติก่อนเผาของชิ้นงานที่เตรียมจากสูตรเนื้อดินปั้น NLB-1+B

สูตร	การหดตัวเชิงเส้น (%)	ความแข็งแรงต่อแรงดัด (MPa)
NLB-1+B	4.55 (±0.50)	1.49 (±0.54)

ตารางที่ 2.23 สมบัติหลังเผาที่อุณหภูมิ 1,150 องศาเซลเซียส ของชิ้นงานที่เตรียมจากสูตรเนื้อดินปั้น NLB-1+B

สูตร	การหดตัวเชิงเส้น (%)	การดูดซึมน้ำ (%)	ความแข็งแรงต่อแรงดัด (MPa)
NLB-1+B	14.51 (±0.50)	0.15 (±0.06)	28.07 (±6.27)



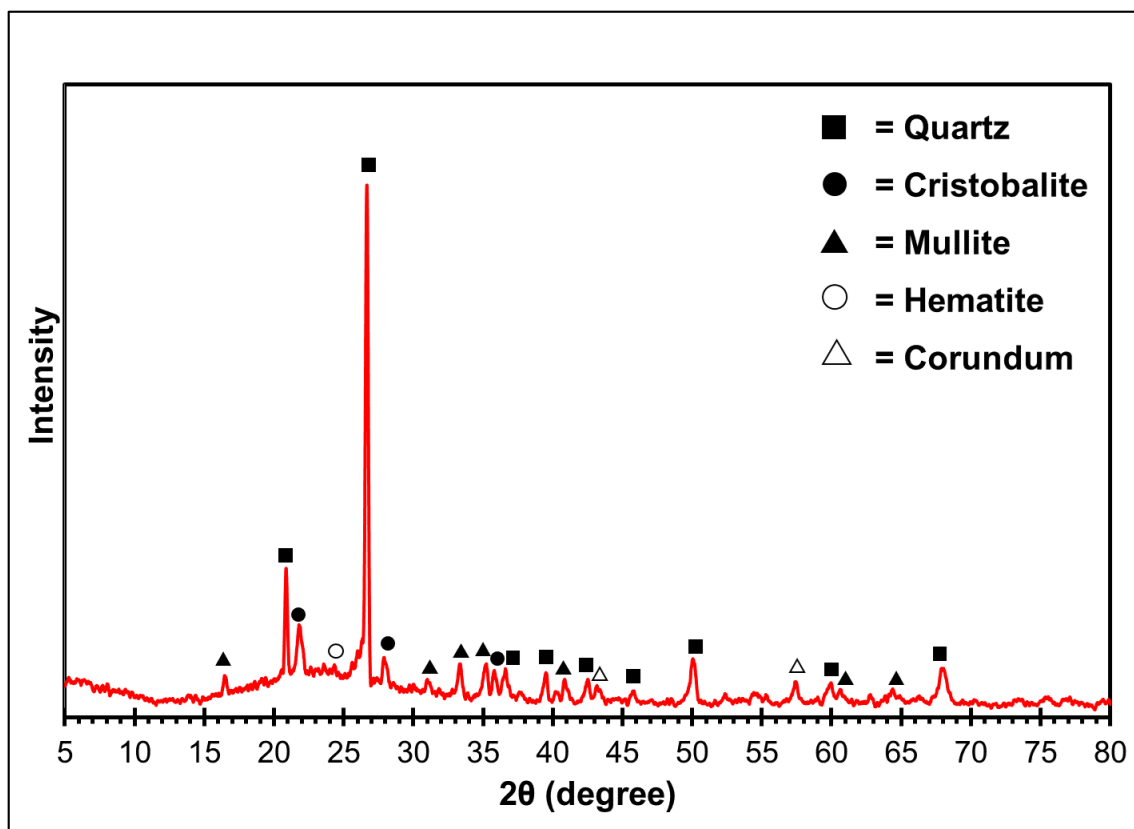
ภาพที่ 2.6 สมบัติก่อนและหลังเผาที่อุณหภูมิ 1,150 องศาเซลเซียส ของชิ้นงานที่เตรียมจากสูตรเนื้อดินปั้น NLB-1 และ NLB-1+B

เมื่อนำดินปั้นสูตร NLB-1+B มาขึ้นรูปเป็นกระเบื้องและเผาที่อุณหภูมิ 1,150 องศาเซลเซียส พบว่ากระเบื้องมุงหลังคาที่มีลักษณะแสดงดังภาพที่ 2.7 จะเห็นได้ว่ากระเบื้องหลังเผาจะมีสีน้ำตาลแดงซึ่งเป็นผลมาจากการมีเหล็กเจือปนในเนื้อดินแดง และเมื่อพิจารณาค่าสีของกระเบื้องมุงหลังคาหลังเผาโดยการวัดสี 10 จุดบนกระเบื้อง 1 แผ่น และสุ่มวัดกระเบื้องจำนวน 3 แผ่น ด้วยเครื่อง color meter พบว่ามีค่า L^* อยู่ในช่วง 41.32 ถึง 41.56 ค่า a^* อยู่ในช่วง +10.70 ถึง +11.11 และค่า b^* อยู่ในช่วง +17.45 ถึง +17.87



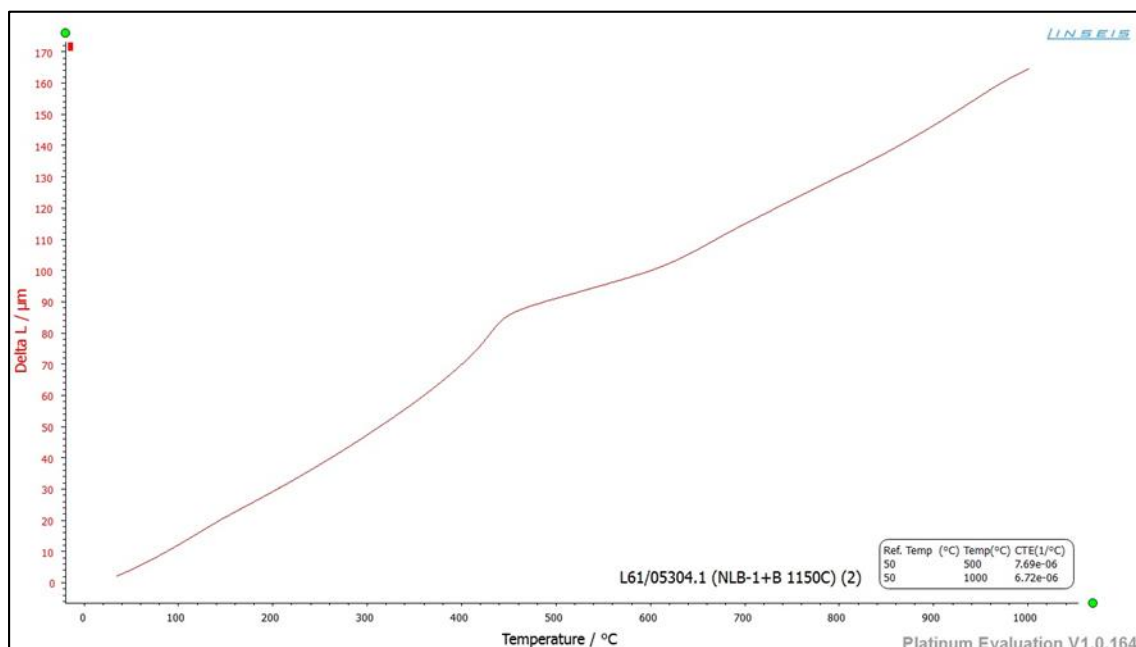
ภาพที่ 2.7 ลักษณะกระเบื้องมุงหลังคาที่ขึ้นรูปด้วยสูตร NLB-1+B หลังเผาที่ 1,150 องศาเซลเซียส

ในส่วนขององค์ประกอบทางแร่วิทยาของกระเบื้องมุงหลังคาสูตร NLB-1+B หลังเผาที่ 1,150 องศาเซลเซียส แสดงดังภาพที่ 2.8 พบว่ามีองค์ประกอบของควอตซ์ คริสโตบาไลต์ และมัลไลต์ นอกจากนั้นยังพบฮีมาไทต์ และคอร์ันดัมเล็กน้อย ซึ่งการมีมัลไลต์ในชิ้นงานส่งผลให้ความแข็งแรงมีค่าสูงขึ้น โดยมัลไลต์เกิดจากการทำปฏิกิริยาของดินที่เป็นส่วนผสมในสูตรดินปั้น ซึ่งเป็นไปตามกรอบแนวคิดของโครงการและเฟสไดอะแกรมในภาพที่ 1.2 ส่วนคริสโตบาไลต์เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนเฟสของควอตซ์ที่อุณหภูมิสูง นอกจากนั้นเมื่อพิจารณาปริมาณของผลึกและออสันฐานด้วยการคำนวณพื้นที่ได้แผนภาพพบว่ามีปริมาณผลึกอยู่ร้อยละ 59 และปริมาณออสันฐานอยู่ร้อยละ 41 และเมื่อวิเคราะห์เชิงปริมาณของแร่แต่ละชนิดที่อยู่ในรูปผลึกด้วยเทคนิค Rietveld ด้วยโปรแกรม TOPAS พบว่าควอตซ์ร้อยละ 28.34 คริสโตบาไลต์ร้อยละ 5.44 มัลไลต์ร้อยละ 12.15 ฮีมาไทต์ร้อยละ 3.17 และคอร์ันดัมร้อยละ 9.61 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับสูตร NLB-1



ภาพที่ 2.8 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD ของเนื้อดินปั้นสูตร NLB-1+B หลังเผาที่ 1,150 องศาเซลเซียส

สำหรับสมบัติทางความร้อนของกระเบื้องมุงหลังคาสูตร NLB-1+B หลังเผาที่ 1,150 องศาเซลเซียส ได้พิจารณา 2 สมบัติ คือ การขยายตัวเนื่องจากความร้อนและความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงความร้อนอย่างเฉียบพลัน ผลการทดลองพบว่าค่าการขยายตัวทางความร้อนของกระเบื้องในช่วงอุณหภูมิ 50-400 องศาเซลเซียส มีค่า 7.39×10^{-6} ต่อองศาเซลเซียส และมีความต้านต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างเฉียบพลันซึ่งพิจารณาจากการแตกร้าวของชิ้นงานหลังการทดสอบด้วยการแช่สีย้อมและร้อยละค่าความแข็งแรงของกระเบื้องที่ลดลงหลังผ่านการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างเฉียบพลัน โดยพบว่าหลังการทดสอบไม่พบรอยแตกที่ผิวของชิ้นงาน และมีค่าความแข็งแรงของกระเบื้องลดลงเป็น 20.77 เมกะพาสคัล คิดเป็นร้อยละ 26.01 ซึ่งค่าความแข็งแรงดังกล่าวยังคงสูงกว่าค่ามาตรฐานในมอก. 158-2518 เซลเซียส ซึ่งสอดคล้องกับกราฟการขยายตัวเนื่องจากความร้อนในภาพที่ 2.9 พบว่าที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ไม่มีการเปลี่ยนแปลงความชันจากการขยายตัวของเฟสควิลิตโตไบไลต์อย่างเห็นได้ชัด อีกทั้งค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวในช่วง 50-200 องศาเซลเซียส มีค่าไม่สูงมาก (5.37×10^{-6} ต่อองศาเซลเซียส) ประกอบกับกระเบื้องมีความแข็งแรงขึ้นจึงมีความทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลันได้มากขึ้น นอกจากนี้ยังได้ทำการวัดค่าการโค้งตัว (sacking) หลังเผาที่อุณหภูมิ 1,150 องศาเซลเซียส พบว่ามีค่า 6.5 มิลลิเมตร ซึ่งถือว่าเป็นค่าที่รับได้สำหรับโรงงาน และเป็นค่าที่เหมาะสมในการนำไปใช้ผลิตกระเบื้องดินเผาungหลังคา



ภาพที่ 2.9 ผลวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนเนื้อดินปั้นสูตร NLB-1+B

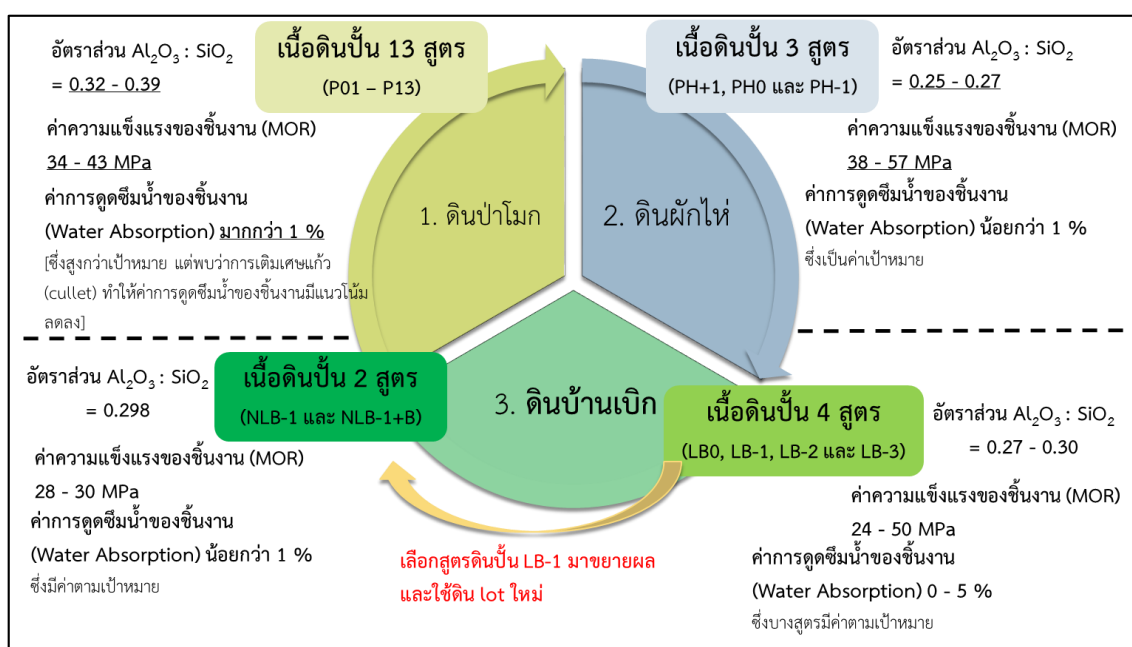
นอกจากนี้ยังได้นำชิ้นงานกระเบื้องดินเผาungหลังคาไปทดสอบการเกิดสหาร่ายซึ่งมีรายละเอียดแสดงไว้ในภาคผนวก ง จากผลการทดสอบพบว่าไม่พบการเกิดสหาร่าย แสดงเห็นแนวโน้มว่าอิฐสูตรนี้น่าไม่เกิดสหาร่ายซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งของการคราบดำและการเปลี่ยนแปลงของกระเบื้องให้ลดลง อย่างไรก็ตามควรมีการเพิ่มเวลาทดสอบเพื่อให้เห็นผลชัดเจน

เมื่อนำกระเบื้องที่พัฒนาได้ไปเคลือบด้วยสูตรเคลือบดั้งเดิมของโรงงานดังแสดงในภาพที่ 2.8 พบว่าผลิตภัณฑ์หลังเผาเคลือบมีลักษณะที่ดี เคลือบสามารถเกาะติดผิวกระเบื้องได้ดีโดยไม่หลุดร่อน เมื่อนำไปทดสอบความทนทานต่อการรานของกระเบื้องชนิดเคลือบตามมาตรฐาน มอก. 2398 เล่ม 11 พบว่ากระเบื้องผ่านการทดสอบความทนทานต่อการราน กล่าวคือไม่เกิดการรานทั้งก่อนและหลังทดสอบ แต่อย่างไรก็ตามพบว่ายังมีกระเบื้องบางแผ่นมีการรานก่อนการทดสอบ ซึ่งสาเหตุมาจากความหนาของเคลือบที่หนาเกินไป และอาจเป็นตำแหน่งของการวางกระเบื้องในเตาเผา ที่มีการกระจายความร้อนไม่สม่ำเสมอ ซึ่งเป็นเรื่องที่ควรมีการศึกษาและพัฒนาต่อไป เพื่อทำให้ได้สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตกระเบื้องดินเผาungหลังคาชนิดเคลือบที่ผลิตจากเนื้อดินแดง



ภาพที่ 2.10 ลักษณะกระเบื้องมุงหลังคาที่ขึ้นรูปด้วยสูตร NLB-1+B หลังเผาที่ 1,150 องศาเซลเซียส หลังเคลือบ

จากการทดลองเนื้อดินปั้นที่ได้กล่าวมาทั้งหมด เพื่อช่วยให้เห็นถึงเส้นทางการทำวิจัยได้ง่ายมากขึ้น จึงได้นำมาสรุปเป็นแผนผังได้ดังภาพที่ 2.11



ภาพที่ 2.11 แผนผังสรุปผลการพัฒนาเนื้อดินปั้นจากแหล่งดินต่าง ๆ

2.3 การถ่ายทอดเทคโนโลยี

ทางผู้วิจัยได้นำเทคโนโลยีและความรู้ที่ได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการไปถ่ายทอดให้ บริษัท ซีวีบี เซรามิก จำกัด ซึ่งเป็นโรงงานผู้ผลิตกระเบื้องดินเผาungหลังคาดูดซึมน้ำต่ำโดยใช้เนื้อดินผสมเนื้อดินแดงท้องถิ่น ตั้งอยู่ที่อำเภอนครชัยศรี จังหวัดนครปฐม ในวันจันทร์ที่ 30 เมษายน 2561 เพื่อเป็นการนำงานผลงานวิจัยเข้าสู่โรงงานผลิตจริง นอกจากนั้นยังเป็นการช่วยให้เกิดการปรับปรุงแก้ไขงานวิจัยบางส่วนให้เหมาะสมต่อการ

นำไปผลิตในเชิงพาณิชย์ โดยมีภาพกิจกรรมบางส่วนแสดงดังภาพที่ 2.12 และกระบวนการผลิตกระเบื้องมุงหลังคาบางส่วนในโรงงานแสดงดังภาพที่ 2.13 ซึ่งได้รับผลตอบรับจากทางผู้ประกอบการเป็นอย่างดี



ภาพที่ 2.12 กิจกรรมในการถ่ายทอดเทคโนโลยี ณ บริษัท ซีวีบี เซรามิก จำกัด



ภาพที่ 2.13 ลักษณะการทำงานและการผลิตชิ้นงานในโรงงานของ บริษัท ซีวีบี เซรามิก จำกัด

2.4 การสำรวจความคิดเห็นต่อกระเบื้องดินเผาungหลังคา

การสำรวจความคิดเห็นของการตอบรับกระเบื้องดินเผาungหลังคา โดยใช้แบบสอบถามและเก็บข้อมูลโดยเว็บสำรวจออนไลน์ พบว่ามีผู้ร่วมตอบแบบสอบถามจำนวน 17 คน ประกอบด้วยบุคคลทั่วไป ตัวแทนจำหน่าย/ขายวัสดุก่อสร้าง วิศวกร และผู้บริหาร/ผู้อยู่อาศัยที่ใช้งานกระเบื้องดินเผา โดยมีผู้ตอบคำถามที่เกี่ยวข้องกับการกระเบื้องดินเผาไปใช้ก่อสร้างที่อยู่อาศัยจำนวน 9 คน รองลงมา คือโรงแรมและรีสอร์ทจำนวน 3 คน สถาปัตยกรรมไทยจำนวน 2 คน และอาคารเรียนในมหาวิทยาลัย วัด และอาคารสำนักงานอย่างละ 1

คน จากการสอบถามระยะเวลาความถี่ที่ใช้ในการเปลี่ยนกระเบื้องมุงหลังคาดินเผาเพื่อสื่อถึงอายุการใช้งานของกระเบื้อง พบว่าผู้ตอบคำถามส่วนใหญ่มีความเห็นว่ากระเบื้องควรใช้เวลามากกว่า 10 ปี และมีเพียงบางส่วนเท่านั้นที่เห็นว่าควรใช้งานได้ 3-5 ปี เมื่อให้ระบุถึงปริมาณการใช้งานกระเบื้องดินเผาในงานหรืออาคาร พบว่าปริมาณการใช้ส่วนใหญ่คือ 100-300 ตารางเมตร และมากกว่า 500 ตารางเมตร โดยมีผู้ตอบคำถามจำนวนเท่ากันคือ 5 คน เมื่อสอบถามเกี่ยวกับคุณลักษณะกระเบื้องดินเผาหลังคาต่าง ๆ โดยใช้เกณฑ์คะแนน 1-6 โดย 1 สำคัญที่สุด ผลการข้อมูลทีวิเคราะห์ตามหลักทางสถิติ พบว่าผู้ตอบคำถามส่วนใหญ่ให้ความสำคัญกับความแข็งแรงมากที่สุด รองลงมาคือสี ราคา รูปแบบ คุณสมบัติพิเศษ และขนาด นอกจากนี้จากการสอบถามเกี่ยวกับราคาของกระเบื้องดินเผาหลังคาที่ลดการสะสมของตะไคร่และคราบดำ มีความแข็งแรง ทนทานต่อการติดตั้ง และการใช้งาน นอกจากนั้นยังต้องมีความสวยงามเท่ากับกระเบื้องแบบดั้งเดิม ผู้ตอบคำถามส่วนใหญ่พอใจในราคา 300-500 บาทต่อตารางเมตร รองลงมาคือน้อยกว่า 300 บาทต่อตารางเมตร 500-700 บาทต่อตารางเมตร และไม่สนใจเรื่องราคา ซึ่งมีจำนวน 1 คน

จากข้อมูลที่สามารถสรุปได้ว่ากระเบื้องดินเผาหลังคายังเป็นที่ใช้งานทั่วไป โดยผู้ใช้อย่างคำนึงถึงสมบัติของผลิตภัณฑ์มากกว่าราคา กระเบื้องดินเผาหลังคาที่ลดการสะสมของตะไคร่และคราบดำ ราคาจำหน่ายที่ผู้ใช้ส่วนใหญ่ยอมรับได้คือ 300-500 บาทต่อตารางเมตร แต่อย่างไรก็ตามยังผู้ใช้ที่ไม่ได้คำนึงถึงราคาแต่เน้นคุณภาพสินค้าเป็นสำคัญ ซึ่งน่าจะเป็นกลุ่มลูกค้าที่ยอมซื้อกระเบื้องดินเผาหลังคาดูดซึมน้ำต่ำ บริษัทผู้ประกอบการที่ร่วมโครงการตั้งเป้าหมายกลุ่มลูกค้าที่ต้องการบริโภคกระเบื้องดินเผาที่มีคุณภาพสูง ซึ่งเพิ่มทางเลือกให้กับผู้บริโภค ปัจจุบันผู้ขายกระเบื้องดินเผาคุณภาพสูงยังมีจำกัดและยังต้องนำเข้าจากต่างประเทศ

สำหรับราคาของกระเบื้องดินเผาที่ผู้ประกอบการตั้งใจจะจำหน่ายประมาณตารางเมตรละ 1,300-1,800 บาท โดยไม่เกิดการสะสมของตะไคร่ซึ่งเป็นสาเหตุของคราบดำบนกระเบื้องตลอดอายุการใช้งานของกระเบื้องดินเผา ประมาณมากกว่า 30 ปี เมื่อเทียบกับกระเบื้องแบบเดิมพบว่ากระเบื้องแบบเดิมมีระยะเวลาในการเปลี่ยนใหม่อยู่ระหว่าง 5-10 ปี เนื่องจากความแข็งแรงที่ไม่มากประกอบกับการสะสมความชื้น ทำให้เกิดตะไคร่เกาะหนาที่ผิวของกระเบื้อง ส่งผลต่อความสวยงามและความทนทาน รวมทั้งยังสร้างความสกปรกให้กับบริเวณโดยรอบด้วย

บทที่ 3

สรุปและ

อภิปรายผลการดำเนินงานวิจัย

บทที่ 3

สรุปและอภิปรายผลการดำเนินงานวิจัย

ผลดำเนินงานของโครงการสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1. สามารถพัฒนาสูตรเนื้อกระเบื้องดินเผาungหลังคาโดยใช้แหล่งดินเหนียวบ้านเบิก อ.ท่าม่วง จ.ลพบุรี โดยใช้ดินเหนียวบ้านเบิก lot No.2 ร้อยละ 49 ดินขาวระนอง ร้อยละ 21 ดินดำนครศรีธรรมราช ร้อยละ 6.9 ควอตซ์ 12.5 และเศษแก้วร้อยละ 10 สามารถนำไปผลิตได้โดยใช้กระบวนการขึ้นรูปแบบ Ram press ซึ่งเป็นกระบวนการขึ้นรูปกระเบื้องที่ใช้ในโรงงานต้นแบบ อย่างไรก็ตามในกรณีที่ต้องการนำสูตรนี้ไปขึ้นรูปด้วยวิธีอื่น อาทิ อัดผงแห้ง รีดขึ้นรูป จำเป็นต้องศึกษาและปรับสัดส่วนความชื้นให้เหมาะสมกับวิธีการขึ้นรูป นอกจากนี้ทางผู้ประกอบการยังสามารถนำสูตรที่ได้นี้ไปพัฒนาเป็นกระเบื้องดินเผาเคลือบให้มีความสวยงามและมีสีหลากหลายเพื่อเพิ่มช่องทางในการจำหน่าย สำหรับดินเหนียวบ้านเบิก lot No.2 เดิมถูกนำไปใช้ผลิตเป็นอิฐมอญซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ราคาต่ำ การนำดินดังกล่าวมาพัฒนาเป็นสูตรเนื้อกระเบื้องดินเผาungหลังซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีราคาแพงกว่าจะช่วยเพิ่มมูลค่าของดินเหนียวในแหล่งนี้ต่อไป

2. สามารถเตรียมกระเบื้องดินเผาที่มีค่าการดูดซึมน้ำต่ำกว่าร้อยละ 1 จากผลการวิเคราะห์ปริมาณเนื้อแก้ว (glassy phase) ในกระเบื้องพบว่าสูงถึงร้อยละ 41 ค่าการดูดซึมน้ำต่ำกว่าร้อยละ 1 และความแข็งแรงผ่านเกณฑ์ตามมาตรฐาน มอก 158-2518 สำหรับการใช้เศษแก้วเป็นส่วนผสมในการพัฒนาเนื้อกระเบื้องมีการวิจัยอย่างต่อเนื่อง ดังผลงานวิจัยที่ผ่านมาของ อภิรัฐและคณะ¹³ ได้ผสมเศษแก้วโซดาโล่กับเนื้อดินแดงและดินสโตนแวร์ พบว่าเพียงร้อยละ 10 ก็สามารถได้เนื้อเซรามิกดูดซึมน้ำต่ำกว่าร้อยละ 1 เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 1125–1150 องศาเซลเซียส Kim และคณะ¹⁴ พบว่าใช้ปริมาณเศษแก้วจากจอ LCD ร้อยละ 5 เผาที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียส สามารถลดค่าดูดซึมน้ำได้ต่ำกว่าร้อยละ 1 Youssef และคณะ¹⁵ ใช้เศษแก้ว ปริมาณร้อยละ 10 ในเนื้อกระเบื้องบุผนัง เผาที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส ได้ค่าดูดซึมน้ำหลังเผาร้อยละ 8 ซึ่งสูงกว่าค่าการดูดซึมน้ำของเนื้อกระเบื้องที่ใช้สูตรเนื้อดินปั้น LB-2 และ LB-3 ที่พัฒนาจากโครงการนี้ เปรียบเทียบในปริมาณเศษแก้วและอุณหภูมิเผาเดียวกัน มีผลทดสอบการดูดซึมน้ำหลังเผาร้อยละ 5 ถือว่าเป็นสมบัติการดูดซึมน้ำทั่วไปของกระเบื้องดินเผาungหลังคาในท้องตลาด สำหรับค่าการดูดซึมน้ำต่ำกว่าร้อยละ 1 จะช่วยให้ลดความชื้นที่แทรกซึมเข้าไปในเนื้อกระเบื้องทำให้ลดผลกระทบจากการขยายตัวของน้ำแข็งในเนื้อกระเบื้องเมื่ออยู่ในสภาพอุณหภูมิต่ำ (<0 °C) นอกจากนี้การลดความชื้นสะสมในเนื้อกระเบื้องจะช่วยลดการเกิดคราบดำจากสาหร่ายต่าง ๆ ที่มีกบบนหลังคาบ้านที่ใช้วัสดุungหลังคาดูดซึมน้ำสูง อาทิ สาหร่าย สกุล Chlorella ซึ่งพบบริเวณคราบสีเขียวบนพื้นผิวกระเบื้องดินเผา อิฐ และซีเมนต์¹⁶

3. สามารถพัฒนาเนื้อกระเบื้องที่ไม่แตกร้าวและเสียหายในขณะนำผลิตภัณฑ์ออกจากเตาที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นผลจากการออกแบบสูตรเนื้อดินปั้นให้มี อัตราส่วน $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.298 ซึ่งช่วยลด $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{SiO}_2$ ของดินดิบ (บ้านเบิก lot No.2) ที่มีค่าประมาณ 0.31 ทำให้ปริมาณซิลิกาอิสระในเนื้อกระเบื้องหลังเผาผลาญลดลง เป็นผลให้เกิดเฟสคริสโตบาไลต์ลดลง ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ปริมาณคริสโตบาไลต์ในเนื้อกระเบื้องพบว่ามีความร้อยละ 5 โดยปริมาณนี้ถือว่าไม่มีผลกระทบต่อการใช้งานเมื่อนำผลิตภัณฑ์ออกจากเตาที่อุณหภูมิดังกล่าว อย่างไรก็ตามปริมาณของซิลิกาสูงในเนื้อกระเบื้องร้อยละ 12 มีผลช่วยลดค่าการขยายตัวของเนื้อผลิตภัณฑ์หลังเผา และเพิ่มความแข็งแรง ทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างเฉียบพลันได้อีกด้วย

4. การวิจัยนี้เน้นพัฒนาสูตรเนื้อดินผสมดินแดงที่มีความแข็งแรงเทียบเท่าผลิตภัณฑ์ในกลุ่มสโตนแวร์ นั้นใช้วัตถุดิบที่มีในท้องถิ่น โดยเฉพาะดินแดงซึ่งเป็นส่วนผสมหลักประมาณร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก กระบวนการเตรียมเนื้อดิน การขึ้นรูปและการเผาผลิตภัณฑ์กระเบื้องดินเผาไม่ยุ่งยากและซับซ้อน โรงงานผลิตกระเบื้องดินเผาungหลังคาในประเทศสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้กับกระบวนการผลิตของตนเอง โดยใช้ดินแดงที่อยู่ในพื้นที่ นอกจากนี้ยังสามารถนำไปต่อยอดในการสร้างผลิตภัณฑ์ในรูปแบบอื่น ๆ อาทิ กระเบื้องปูพื้น จานชาม หรือพัฒนาเป็นเครื่องเคลือบดินเผาที่มีสีสันสวยงาม เพิ่มความหลากหลายของสินค้าทำให้ช่วยเพิ่มช่องทางการจัดจำหน่ายและรายได้ให้เพิ่มขึ้น

ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการ

1. สามารถนำองค์ความรู้มาพัฒนาคุณภาพกระเบื้องดินเผาungหลังคาให้มีคุณสมบัติที่สูงขึ้น ช่วยเพื่อเพิ่มโอกาสในทางการตลาดและนำไปต่อยอดในการผลิตเชิงพาณิชย์ของโรงงานผลิตวัสดุก่อสร้าง
2. ได้ข้อมูลแหล่งดินแดงที่ทราบคุณสมบัติทางเคมี กายภาพ และเซรามิก ซึ่งมีศักยภาพเหมาะสมต่อการผลิตกระเบื้องดินเผาungหลังคา และนำไปใช้กับผลิตภัณฑ์ดินแดงอื่น ๆ
3. เพิ่มแหล่งข้อมูลดินแดงในประเทศ ซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบให้โรงงานผลิตเซรามิก

รายงานสรุปการเงินในรอบ 15 เดือน

สัญญาเลขที่ RDG60T0066

โครงการวิจัยเรื่อง การพัฒนาสูตรเนื้อกระเบื้องดินเผาungหลังการดูดซึมน้ำต่ำโดยใช้เนื้อดินผสมเนื้อดินแดงท้องถิ่น

(Development of low absorption clay roof tile from the local red clay based mixtures)

รายงานสรุปการเงินในรอบ 15 เดือน

ชื่อหัวหน้าโครงการวิจัยผู้ขอรับทุน

อาจารย์ ดร. สิริพรรณ นิลไพรัช

รายงานการเงิน งวดที่ 1+2 จากจำนวน 3 งวด

รายงาน ตั้งแต่วันที่ 31 พฤษภาคม 2561 ถึง วันที่ 31 สิงหาคม 2561

รายจ่าย

หมวด(ตามสัญญา)	รายจ่ายสะสมจากรายงานครั้งก่อน (งวดที่ 1) (1)	ค่าใช้จ่ายงวดปัจจุบัน (งวดที่ 2) (2)	รวมรายจ่ายสะสมจนถึงงวดปัจจุบัน (3) = (1) + (2)	งบประมาณทั้งหมดที่ตั้งไว้ตามสัญญา (4)	งบประมาณคงเหลือ(หรือเกิน) (5) = (4) - (3)
ก. ส่วนที่โครงการบริหาร					
1. ค่าตอบแทน	-	48,750.00	48,750.00	65,000.00	16,250.00
2. ค่าจ้าง	90,000.00	90,000.00	180,000.00	180,000.00	-
3. ค่าใช้สอย	146,010.55	114,865.00	260,875.55	314,000.00	53,124.45
4. ค่าวัสดุ	-	123,035.90	123,035.90	71,000.00	(52,035.90)
5. ค่าครุภัณฑ์	-	-	-	-	-
รวม	236,010.55	376,650.90	612,661.45	630,000.00	17,338.55
ข. ส่วนที่บริหารโดยสกว.					
6. ค่าบำรุงสถาบันฯ งบพิเศษก.	-	-	-	63,000.00	63,000.00
รวม	-	-	-	63,000.00	63,000.00
รวมทั้งสิ้น	236,010.55	376,650.90	612,661.45	693,000.00	80,338.55

งบประมาณคงเหลือ 80,338.55 บาท ประกอบด้วย

ค่าจ้างรับ	ค่าตอบแทน	16,250.00
	ค่าบำรุงสถาบันฯ	63,000.00
	รวมค่าจ้างรับ	79,250.00
บวก	เงินคงเหลือในมือ	1,088.55
	รวม	80,338.55

สรุปรายละเอียดงบประมาณงวดที่ 1+2 ในรอบ 15 เดือน

รายการ	งบประมาณ งวดที่ 1+2		
	ที่ได้รับ	ค่าใช้จ่าย	คงเหลือ
1. ค่าตอบแทน	48,750.00	48,750.00	-
2. ค่าจ้างผู้ช่วยวิจัย	180,000.00	180,000.00	-
3. ค่าใช้สอย	314,000.00	260,875.55	53,124.45
4. ค่าวัสดุ	71,000.00	123,035.90	(52,035.90)
รวม	613,750.00	612,661.45	1,088.55

บรรณานุกรม

- 1) Dinsdle, A, (1986) Pottery Science Material Process and Products, Ellis Horwood limited, Chichester.
- 2) Ernest M. Levin, Carl R. Robbins and Howard F. McMurdie (1964) Phase diagrams for Ceramists, The American Society, Inc.
- 3) Maynard P. Bauleke. (2015) How to Solve the Problem Body Cracking and Glaze Popping in Stoneware Bodies (online) Available from : http://www.kgs.ku.edu/Publications/Bulletins/211_4/bauleke.html
- 4) ศูนย์โลหะและวัสดุแห่งชาติ (2557) ผลงานวิจัยและพัฒนาสูตรเนื้อดินปั้นและวิธีการใช้งานระบบฐานข้อมูลวัตถุดิบและเนื้อดินสำหรับอุตสาหกรรมเซรามิกและผู้ประกอบการเหมืองแร่ ศูนย์โลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
- 5) สิริพรรณ นิลไพรัช อภิรัฐ ธีรภาพพิเศษพงษ์ อติศักดิ์ ถือพลอย และศรีไฉล ชุนทน (2559) การปรับปรุงเนื้อดินเหนียวพื้นบ้านโดยใช้สารตัวเติม (รายงานการวิจัย, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ ฯ)
- 6) Gualitieri, A.F. (2009). Develop of low –Firing B-Fluxed Stoneware Tiles. *Journal of the American Ceramic Society*, 92 (11), 2571-2577
- 7) Tucci, A., L. Esposito, E. Rastelli, C. Palmonari and E. Rambaldi (2004). "Use of soda-lime scrap-glass as a fluxing agent in a porcelain stoneware tile mix." *Journal of the European Ceramic Society*, 24(1): 83-92.
- 8) Maschio, S., E. Furlani, G. Tonello, N. Faraone, E. Aneggi, D. Minichelli, L. Fedrizzi, A. Bachiorrini and S. Bruckner (2009). "Fast firing of tiles containing paper mill sludge, glass cullet and clay." *Waste Management* 29(11): 2880-2885.
- 9) Tiffo, E., A. Elimbi, J. D. Manga and A. B. Tchamba (2015). "Red ceramics produced from mixtures of kaolinite clay and waste glass" *Brazilian Journal of Science and Technology* 2(1): 1-13.
- 10) Mörtel, H. and F. Fuchs (1997). Recycling of windshield glasses in fired bricks industry. *Key Engineering Materials*: 2268-2271.
- 11) Matteucci, F., M. Dondi and G. Guarini (2002). "Effect of soda-lime glass on sintering and technological properties of porcelain stoneware tiles." *Ceramics International* 28(8): 873-880.

- 12) Pontikes, Y., A. Christogerou, G. N. Angelopoulos, L. Esposito and A. Tucci (2004).
" On the addition of soda- lime scrap glass for the production of heavy clay ceramics." *Ceramurgia + Ceramica Acta* 34(5-6): 199-206.
- 13) Theerapapvisetpong, A. and S. Nilpairach (2015) "Utilization of glass cutting sludge and sanitary ware sludge in ceramic pressed bodies." *Key Engineering Materials* 169-174.
- 14) Kim, K., K. Kim, and J. Hwang (2016) "Characterization of ceramic tiles containing LCD waste glass." *Ceramics International* 42(6): 7626-7631.
- 15) Youssef, N.F., M.F. Abadir, and M.A.O. Shater, "Utilization of soda glass (cullet) in the manufacture of wall and floor tiles." *Journal of the European Ceramic Society* 1998. 18(12): 1721-1727.
- 16) Sandra, G.d.S., B. Patricia, and G. Patricia (2016) "Phototrophic Biofilms on Exterior Brick Substrate." *Research & Reviews in BioSciences* 11(2): 1-10.

ภาคผนวก

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก การใช้ดินเหนียวล่ำปางเป็นวัตถุดิบหลักในเนื้อดินปั้น

ตารางที่ ก-1 ร้อยละ (%) โดยน้ำหนักของวัตถุดิบในสูตรเนื้อดินปั้นที่ใช้ดินเหนียวล่ำปางเป็นวัตถุดิบหลัก

สูตร	วัตถุดิบ				
	ดินเหนียว ล่ำปาง	ดินตำ ลานสกา	ควอตซ์	หินสบู๋	เศษแก้ว
LP1	65.00	5.00	5.00	15.00	10.00

ตารางที่ ก-2 ร้อยละ (%) ของปริมาณออกไซด์ในสูตรเนื้อดินปั้นที่ใช้ดินเหนียวล่ำปางเป็นวัตถุดิบหลัก

สูตร	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	MgO	Al ₂ O ₃ : SiO ₂
LP1	20.24	65.63	7.37	0.74	1.51	1.93	1.38	1.21	0.308

ตารางที่ ก-3 สมบัติก่อนเผาของชิ้นงานที่เตรียมจากสูตรเนื้อดินปั้นโดยใช้ดินเหนียวล่ำปางเป็นวัตถุดิบหลัก

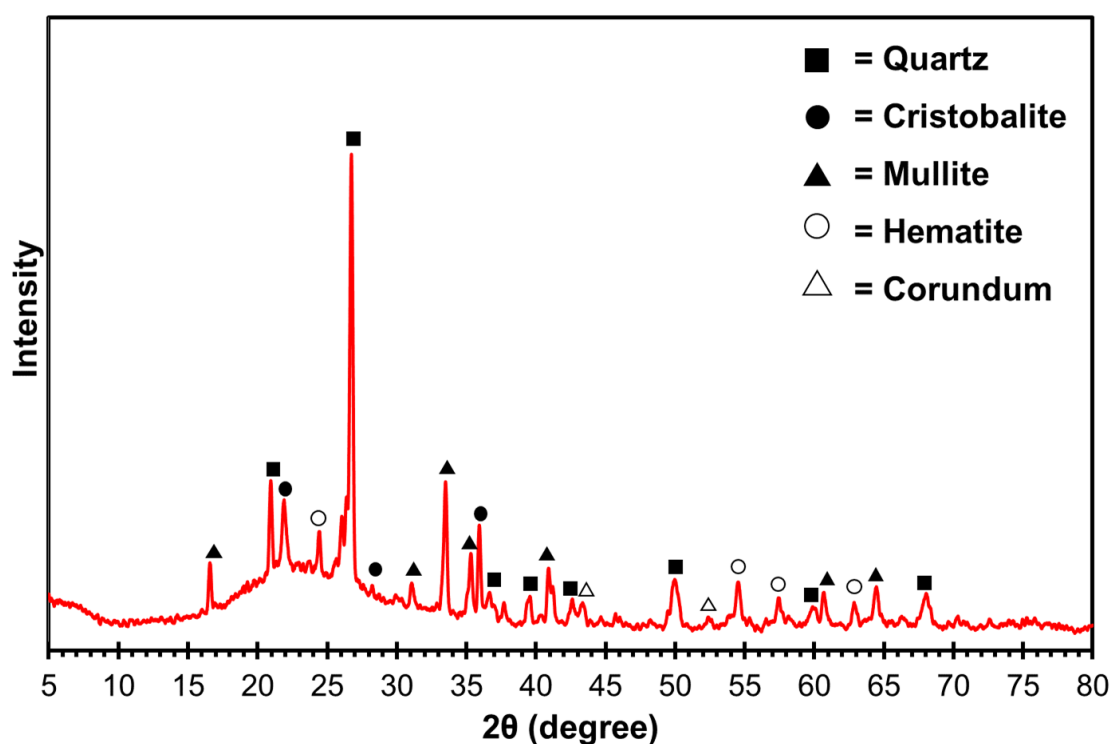
สูตร	ร้อยละการหดตัว เชิงเส้น (%)	ความแข็งแรง ต่อแรงดัด (MPa)
LP	7.52 (±0.35)	3.60 (±0.44)
LP1	5.65 (±0.33)	2.67 (±0.41)

ตารางที่ ก-4 สมบัติหลังเผาที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส ของชิ้นงานที่เตรียมจากสูตรเนื้อดินปั้นโดยใช้ดินเหนียวล่ำปางเป็นวัตถุดิบหลัก

สูตร	การหดตัวเชิงเส้น (%)	การดูดซึมน้ำ (%)	ความแข็งแรงต่อแรงดัด (MPa)
LP	6.88 (±0.49)	0.08 (±0.08)	38.19 (±10.27)
LP1	9.27 (±0.25)	0.06 (±0.08)	34.02 (±8.04)

ตารางที่ ก-5 สมบัติหลังเผาที่อุณหภูมิ 1,150 องศาเซลเซียส ของชิ้นงานที่เตรียมจากสูตรเนื้อดินปั้นโดยใช้ดินเหนียวลำปางเป็นวัตถุดิบหลัก

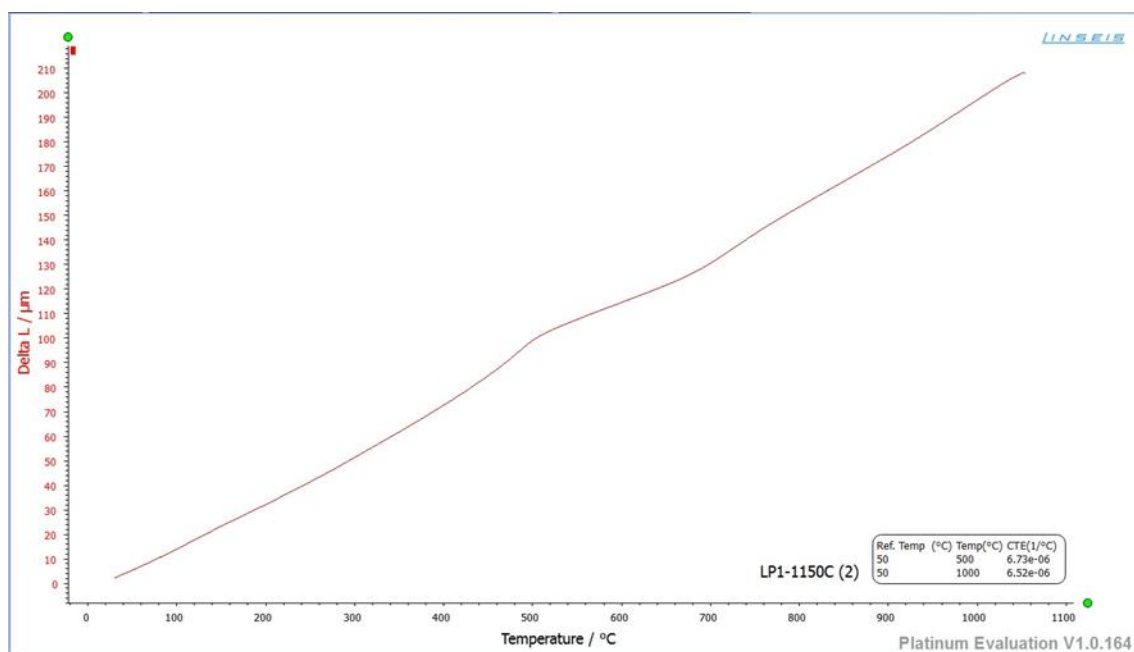
สูตร	การหดตัวเชิงเส้น (%)	การดูดซึมน้ำ (%)	ความแข็งแรงต่อแรงดัด (MPa)	ความแข็งแรงต่อแรงดัดหลังทดสอบความต้านต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างเฉียบพลัน (MPa)
LP	6.99 (± 0.21)	0.03 (± 0.07)	33.26 (± 6.77)	-
LP1	7.86 (± 0.35)	3.75 (± 1.43)	24.15 (± 5.12)	17.54 (± 6.68)



ภาพที่ ก-1 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD ของเนื้อดินปั้นสูตร LP1 หลังเผาที่ 1,150 องศาเซลเซียส

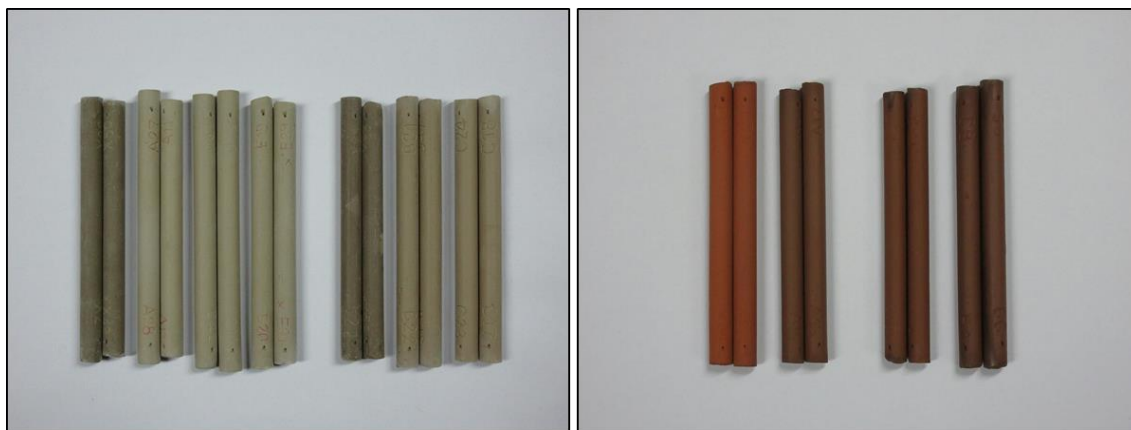
ตารางที่ ก-6 ข้อมูลเชิงปริมาณขององค์ประกอบทางแร่ของชิ้นงานสูตร LP1 หลังเผาที่อุณหภูมิ 1,150 องศาเซลเซียส

ปริมาณอสังฐาน 51.85 %	ปริมาณผลึก 48.15 %				
	Quartz	Cristobalite	Mullite	Hematite	Corundum
	15.55	4.25	15.84	6.34	6.18



ภาพที่ ก-2 ผลวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนเนื้อดินปั้นสูตร LP1
หลังเผาที่ 1,150 องศาเซลเซียส

ภาคผนวก ข ลักษณะชิ้นงานเนื้อดินปั้นที่ใช้ในการทดสอบสมบัติต่าง ๆ

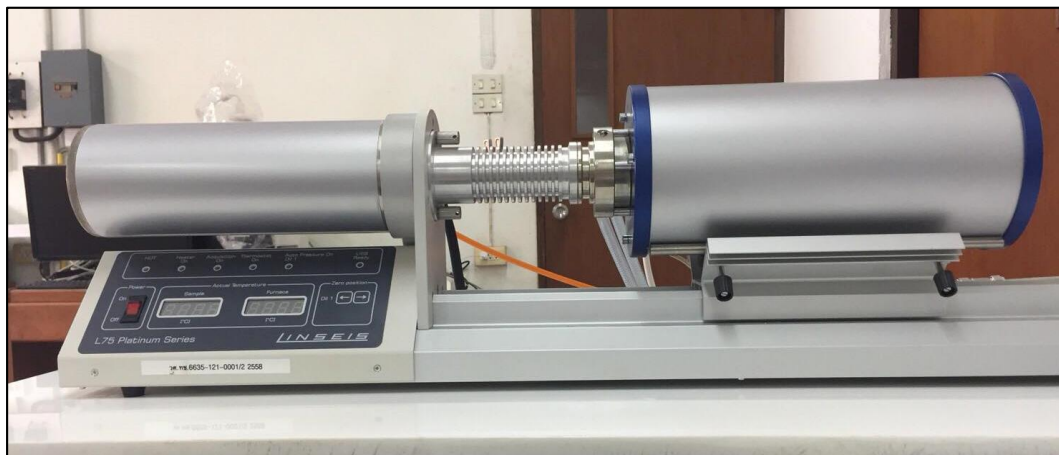


(ก)

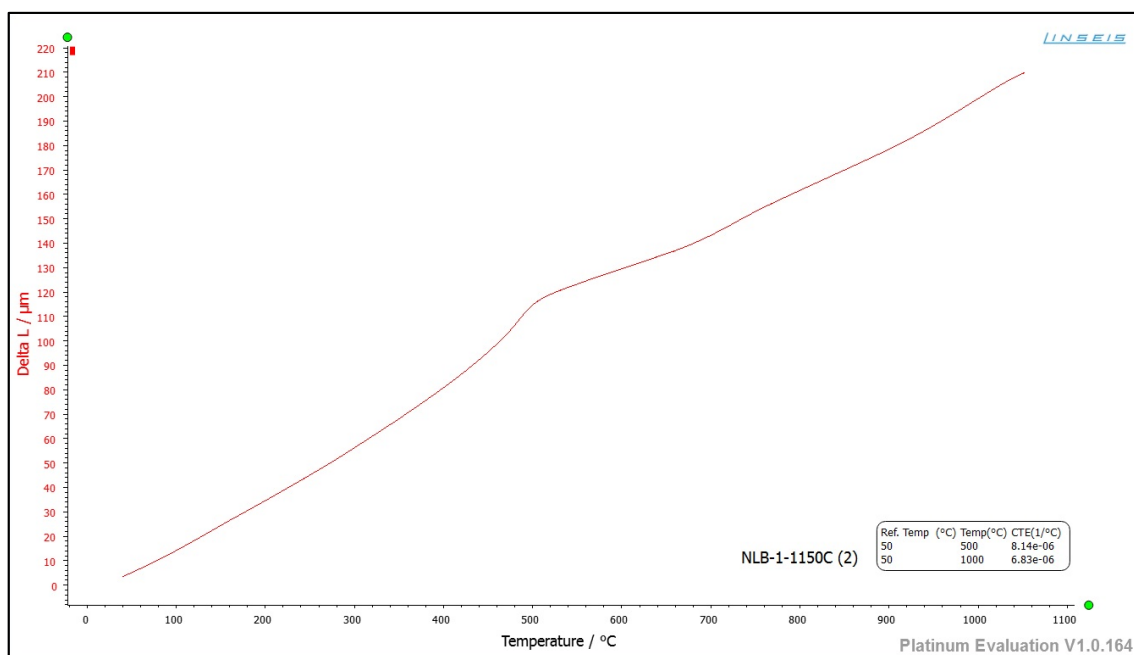
(ข)

ภาพที่ ข-1 ลักษณะชิ้นงานสำหรับทดสอบสมบัติต่าง ๆ ในการทดลอง (ก) ชิ้นงานก่อนเผา (ข) ชิ้นงานหลังเผา

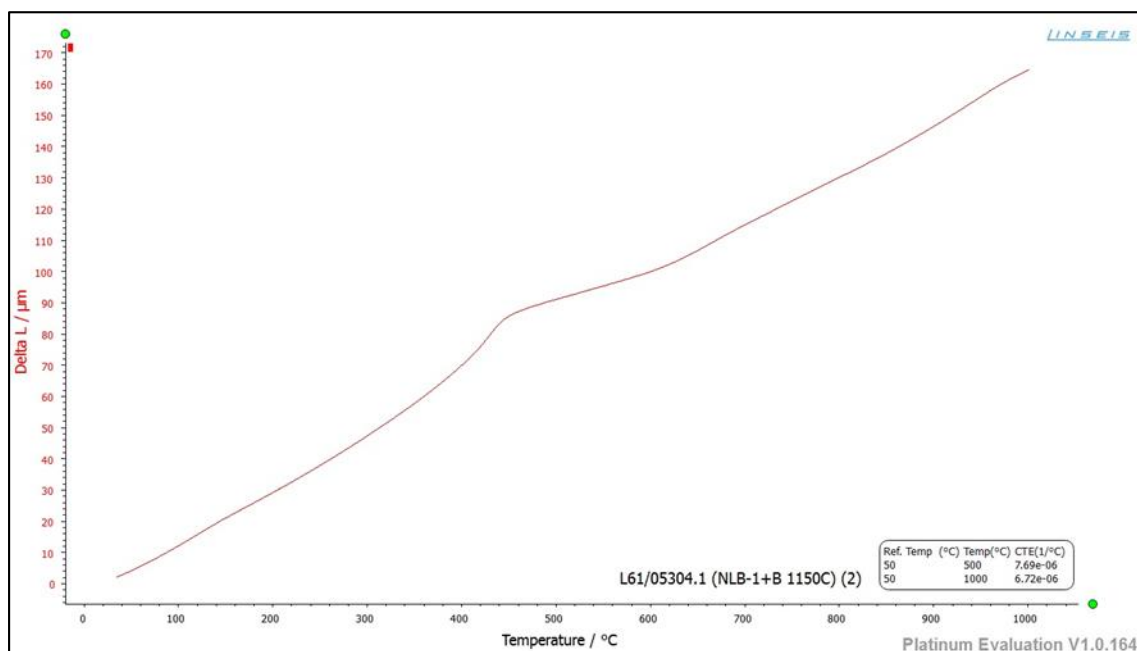
ภาคผนวก ค การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน



ภาพที่ ค-1 เครื่อง Dilatometer บริษัท Linseis รุ่น L75 Platinum Series



ภาพที่ ค-2 ผลวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนเนื้อดินปั้นสูตร NLB-1
หลังเผาที่ 1,150 องศาเซลเซียส



ภาพที่ ค-3 ผลวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนเนื้อดินปั้นสูตร NLB-1+B
หลังเผาที่ 1,150 องศาเซลเซียส

ภาคผนวก ง การทดสอบการเกิดสาหร่ายบนกรเบื้องดินเผา

1. การเตรียมอาหารสำหรับเลี้ยงสาหร่าย

เตรียมสูตรที่ใช้เลี้ยงสาหร่ายจากส่วนผสมในตาราง และนำไปในการทดสอบการเกิดสาหร่ายบนอิฐ ตัวอย่างที่ได้จากสูตร CVB-LB+1 ที่โครงการฯ ได้พัฒนาขึ้นมา

ตารางที่ ง-1 สูตรอาหาร Bold's Basal Medium (BBM) สำหรับอาหาร ปริมาตร 1 ลิตร (Stein, 1979)

สาร	ปริมาตร	ความเข้มข้นของ Stock Solution	ความเข้มข้นสุดท้าย
NaNO ₃	10 mL/L	10 g/400mL dH ₂ O	2.94 mM
CaCl ₂ ·2H ₂ O	10 mL/L	1 g/400mL dH ₂ O	0.17 mM
MgSO ₄ ·7H ₂ O	10 mL/L	3 g/400mL dH ₂ O	0.3 mM
K ₂ HPO ₄	10 mL/L	3 g/400mL dH ₂ O	0.43 mM
KH ₂ PO ₄	10 mL/L	7 g/400mL dH ₂ O	1.29 mM
NaCl	10 mL/L	1 g/400mL dH ₂ O	0.43 mM
P-IV Metal Solution	6 mL/L	-	-
Vitamin B12 Solution	1 mL/L	-	-
Biotin Vitamin Solution	1 mL/L	-	-
Thiamine Vitamin Solution	1 mL/L	-	-

ตารางที่ ง-2 สูตรการเตรียม Vitamin B12 Solution

สาร	ปริมาตร
HEPES buffer pH 7.8	2.4 g/200 mL dH ₂ O
Vitamin B12 (cyanocobalamin)	0.027 g/200 mL dH ₂ O

ตารางที่ ง-3 สูตรการเตรียม Biotin Vitamin Solution

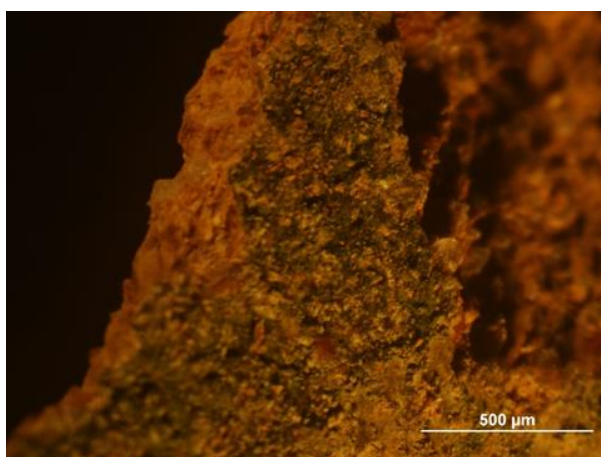
สาร	ปริมาตร
HEPES buffer pH 7.8	2.4 g/200 mL dH ₂ O
Biotin	0.005 g/200 mL dH ₂ O

ตารางที่ ง-4 สูตรการเตรียม Thiamine Vitamin

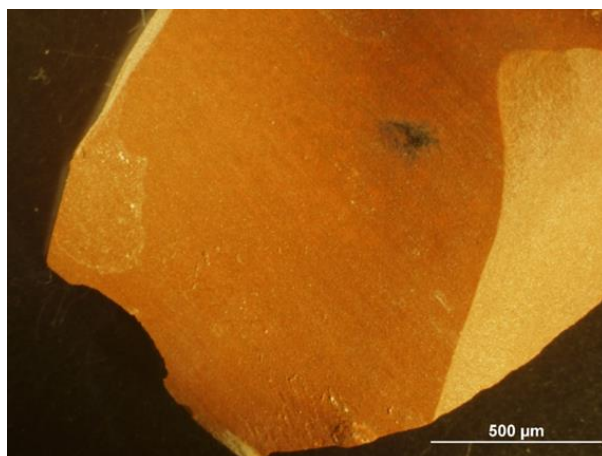
สาร	ปริมาตร
HEPES buffer pH 7.8	2.4 g/200 mL dH ₂ O
Thiamine	0.067 g/200 mL dH ₂ O

2. การตรวจสอบสาหร่ายบนผิวชิ้นงาน

จากการนำตัวอย่างอีฐที่มีคราบดำที่ได้จากสิ่งก่อสร้างมาวิเคราะห์ พบว่า มีส่วนประกอบของสาหร่ายสีเขียวกลุ่มคาร์โอต หลังจากนั้นได้นำอีฐที่พัฒนาได้จากสูตร CVB-LB+1การนาขึ้นตัวอย่างวางในสารละลายที่มีสาหร่าย *Klebsormidium* sp. และ *Chlorella vulgaris* ในอาหาร Bold's Basal Medium เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นวางชิ้นตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ ให้แสงด้วยหลอดฟลูออเรสเซนต์จำนวน 16 ชั่วโมงต่อวัน ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 1 เดือน



ภาพที่ ง-1 ผิวตัวอย่างที่มีคราบดำส่องด้วยกล้องสเตอริโอไมโครสโคป (Olympus SZX-9)



ภาพที่ ง-2 ผิวตัวอย่าง CVB-LB+1 ไม่พบการเกิดสาหร่าย ตรวจสอบด้วยกล้องสเตอริโอไมโครสโคป
(Olympus SZX-9)

ภาคผนวก จ กำหนดการถ่ายทอดเทคโนโลยี

กำหนดการถ่ายทอดเทคโนโลยี (ครั้งที่ 1)

โครงการการพัฒนาสูตรเนื้อกระเบื้องดินเผาungหลังคาตูดซึมน้ำต่ำ
โดยใช้เนื้อดินผสมเนื้อดินแดงท้องถิ่น (RDG60T0066)

ณ บริษัท ซีวีบี เซรามิก จำกัด

6/4 หมู่ที่ 8 ตำบลห้วยพลู อำเภอนครชัยศรี จังหวัดนครปฐม

วันจันทร์ ที่ 30 เมษายน 2561

เวลา	กิจกรรม
09.00 – 10.00 น.	บรรยายการเตรียมเนื้อดินปั้นของกระเบื้อง
10.00 – 12.00 น.	สาธิตการขึ้นรูปกระเบื้อง
12.00 – 13.00 น.	พักรับประทานอาหารกลางวัน
13.00 – 14.00 น.	สาธิตการทดสอบสมบัติทางกายภาพและอื่น ๆ ของกระเบื้อง

ภาคผนวก ฉ แบบสอบถามความคิดเห็นเกี่ยวกับปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจเลือกใช้กระบี่อง ดินเผาungหลังกา

แบบสอบถามความคิดเห็นเกี่ยวกับปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจเลือกใช้กระบี่องดินเผาungหลังกา

แบบสอบถามนี้เป็นส่วนหนึ่งของโครงการการพัฒนาสูตรเนื้อกระบี่องดินเผาungหลังกาดูดซึมน้ำต่ำโดยใช้เนื้อดินผสมเนื้อดินแดงท้องถิ่น

ดำเนินการโดย สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โดยการสนับสนุนทุนวิจัยจาก เครือข่ายองค์กรบริหารงานวิจัยแห่งชาติ (คอบช.)

- วัตถุประสงค์**
- เพื่อหาปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการตัดสินใจเลือกใช้กระบี่องดินเผาungหลังกา
 - เพื่อประเมินความเป็นไปได้ในการนำกระบี่องที่พัฒนาในงานวิจัยนี้ไปใช้งานจริง

คำถาม

1. ผู้ตอบแบบสอบถามมีอาชีพ หรือเกี่ยวข้องกับการใช้งานกระบี่องดินเผาungหลังกาด้านใด
 - ☐ สถาปนิก ☐ วิศวกร ☐ ตัวแทนจำหน่าย/ผู้ขายสินค้าวัสดุก่อสร้าง
 - ☐ ผู้บริโภค/ผู้อยู่อาศัยที่ใช้งานกระบี่องungหลังกาดินเผา ☐ บุคคลทั่วไป
2. คุณเกี่ยวข้องกับการใช้กระบี่องสำหรับอาคารก่อสร้างประเภทใด
 - ☐ โรงแรม, รีสอร์ท ☐ วัด ☐ สถาปัตยกรรมไทย ☐ ที่อยู่อาศัย ☐ อื่นๆ
3. ระยะเวลาความถี่ที่ใช้สำหรับการเปลี่ยนแปลงหรือซ่อมแซมกระบี่องungหลังกาทุกประเภทที่ใช้กับอาคารของท่านหรือในกำกับดูแล
 - ☐ 0-1 ปี ☐ 1-3 ปี ☐ 3-5 ปี ☐ 5-10 ปี ☐ มากกว่า 10 ปี
 - ☐ ไม่ทราบ ไม่เกี่ยวข้อง
4. ปริมาณการใช้งานกระบี่องในงานหรืออาคารที่เกี่ยวข้องกับท่าน โดยประมาณ
 - ☐ น้อยกว่า 100 ตารางเมตร ☐ 100-300 ตารางเมตร ☐ 300-500 ตารางเมตร
 - ☐ มากกว่า 500 ตารางเมตร

5. เรียงลำดับความสำคัญของคุณสมบัติของกระเบื้องที่ใช้ประกอบการตัดสินใจเลือกซื้อหรือใช้งาน (เรียงลำดับจาก 1-6 อันดับ 1 คือสำคัญที่สุด)

คุณสมบัติ	1	2	3	4	5	6
1. ความแข็งแรง						
2. สี						
3. ขนาดกระเบื้อง						
4. รูปแบบ รูปทรง						
5. ราคาต่อตารางเมตร						
6. คุณสมบัติพิเศษ						

6. ท่านคิดว่าถ้ามีกระเบื้องดินเผาungหลังคาที่คงความสวยงามได้เทียบเท่ากระเบื้องแบบดั้งเดิม และมีคุณสมบัติสามารถลดการสะสมของตะไคร่และคราบดำบนผิวได้ มีความแข็งแรงทนทานไม่แตกหักง่าย ระหว่างการติดตั้งและระหว่างการใช้งาน ควรมีราคามากที่สุดเท่าไร ที่ท่านจะยังคงให้ความสนใจพิจารณาเลือกใช้งาน

- ☐ น้อยกว่า 300 บาท ต่อตารางเมตร
- ☐ 300-500 บาท ต่อตารางเมตร
- ☐ 500-700 บาท ต่อตารางเมตร
- ☐ 700-1000 บาท ต่อตารางเมตร
- ☐ ไม่สนใจเรื่องราคา หากกระเบื้องนั้นมีความสวยงามคงทนและใช้งานได้นานกว่ากระเบื้องแบบเดิม

ภาคผนวก ข ตารางเปรียบเทียบวัตถุประสงค์ กิจกรรมที่วางแผนไว้และกิจกรรมที่ดำเนินการมาและผลที่ได้รับตลอดโครงการ

วัตถุประสงค์โครงการ	กิจกรรมที่วางแผน	กิจกรรมที่ดำเนินการ	ผลที่ได้รับตลอดโครงการ
1. พัฒนาสูตรเนื้อกระเบื้องดินเผาung หลังคาโดยใช้เนื้อผสมของดินแดง ท้องถิ่น และเศษแก้ว	1. ทบทวนวรรณกรรม เอกสารและ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนา กระเบื้องดินเผา	1. ทบทวนวรรณกรรม เอกสารและ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนา กระเบื้องดินเผา	1. ได้วิธีการคำนวณสูตรเนื้อดินปั้นโดย ใช้อัตราส่วนของ $Al_2O_3:SiO_2$ เป็น ตัวควบคุม
2. พัฒนาคุณภาพกระเบื้องดินเผาung หลังคาที่ค่าการดูดซึมน้ำต่ำกว่า 1% ลดการขยายตัวเนื่องจาก ความชื้นสูง	1. ผสมขึ้นรูปและเผาสูตรดินปั้นโดยใช้ ดินเหนียวท้องถิ่นและเศษแก้วเป็น วัตถุดิบหลัก 2. ทดสอบสมบัติของชิ้นงานดินปั้นทั้ง ก่อนและหลังเผา	1. ได้สูตรส่วนผสมดินปั้นที่ใช้ดินเหนียว บ้านเบิก อ.ท่าม่วง จ.ลพบุรี 2. ได้ชิ้นงานดินปั้นหลังเผาที่มีค่าการดูด ซึมน้ำต่ำกว่า 1%	2. ได้ทราบผลของอุณหภูมิการเผาที่มี ต่อสมบัติของเนื้อดินปั้นซึ่งใช้ดิน เหนียวจากแหล่งต่าง ๆ และผลของ อัตราส่วนของ $Al_2O_3:SiO_2$ แตกต่าง กันต่อค่าการดูดซึมน้ำ
3. พัฒนาเนื้อกระเบื้องที่มีคริสโต บาไลต์ต่ำเพื่อลดความเสียหายของ ผลิตภัณฑ์ เนื่องจากเปลี่ยนวัฏภาค ขณะลดอุณหภูมิเผา	1. ตรวจสอบองค์ประกอบทางแร่ของ ชิ้นงานหลังเผาที่ผ่านการคัดเลือก	1. ได้ทราบองค์ประกอบทางแร่ของ ชิ้นงานหลังเผาที่ถูกคัดเลือกเพื่อนำไป พัฒนาเป็นกระเบื้องดินเผาungหลังคา	3. ได้ทราบแนวโน้มของปริมาณคริสโต บาไลต์ในเนื้อกระเบื้องที่มีผลต่อ ความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลง อุณหภูมิอย่างเฉียบพลัน

ภาคผนวก ช บทความสำหรับเผยแพร่

ที่ ศธ ๐๕๒๕.๑(๑๙)/๒๓๓๖



กองส่งเสริมวิชาการ สำนักงานอธิการบดี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
๑๕๑๘ ถนนประชากรราษฎร์ ๑ แขวงวงศ์สว่าง
เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร ๑๐๘๐๐

๒๖ ตุลาคม ๒๕๖๑

เรื่อง รับบทความเพื่อตีพิมพ์ลงในวารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

เรียน อาจารย์ ดร.อภิรัฐ อีรภาพิเศษพงษ์

ตามที่ท่านได้ส่งบทความวิจัย เรื่อง การพัฒนากระเบื้องดินเผาungหลังคาดูดซับน้ำดำจากดินแดงพื้นบ้านผสมเศษแก้ว เพื่อเสนอพิจารณาตีพิมพ์ในวารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ นั้น กองบรรณาธิการวารสารได้พิจารณาอนุมัติรับบทความดังกล่าวและให้จัดพิมพ์ลงในวารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีที่ ๒๙ ฉบับที่ ๒ เมษายน – กรกฎาคม ๒๕๖๒

จึงเรียนมาเพื่อโปรดทราบ และหวังเป็นอย่างยิ่งว่าจะได้รับความร่วมมือจากท่านในการส่งบทความเพื่อพิมพ์ลงในวารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือต่อไป

ขอแสดงความนับถือ

(รองศาสตราจารย์ ดร.มนตรี ศิริปรัชญานันท์)

ผู้ช่วยอธิการบดีฝ่ายส่งเสริมวิชาการและกิจการพิเศษ

รองหัวหน้ากองบรรณาธิการวารสาร

กองส่งเสริมวิชาการ

โทร. ๐ ๒๕๕๕ ๒๒๓๘

โทรสาร ๐ ๒๕๕๕ ๒๒๓๖

อัครลักษณ์ กองส่งเสริมวิชาการ : บริการอย่างเป็นมิตร ร่วมแรงคิดพัฒนาสู่สากล

1/21/ 16/05/21



การพัฒนากระเบื้องดินเผาungหลังคาดูดซึมน้ำต่ำจากดินแดงพื้นบ้านผสมเศษแก้ว

อภิรัฐ อีราพิเศษพงษ์*

ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สิริพรรณ นิลโพธิ์

สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

*ผู้พิมพ์ประสานงาน โทรศัพท์ 0-2218-5549 อีเมล : apirat.t@chula.ac.th

รับเมื่อ DD MMMM YYYY ตอบรับเมื่อ DD MMMM YYYY

DOI: 10.14416/j.kmutnb.YYYY.MM.NO.© 2015 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved

บทคัดย่อ (Abstract)

กระเบื้องดินเผาungหลังคาเป็นผลิตภัณฑ์ที่ยังคงได้รับความนิยมใช้งานตามอาคารบ้านเรือน วัด โรงแรม และแหล่งท่องเที่ยวทางวัฒนธรรม กระจ่ายอยู่ทั่วทุกภูมิภาค อย่างไรก็ตามกระเบื้องดังกล่าวยังมีข้อด้อยบางประการ เช่น การเกิดคราบดำจากตะไคร่จากการดูดซึมน้ำสูง สีของผลิตภัณฑ์ไม่สม่ำเสมอ ความแข็งแรงต่ำ อีกทั้ง ในการขึ้นตอนหลังเผาต้องรออุณหภูมิต่ำ (< 200 °C) จึงเอากะเบื้องออกจากเตาโดยไม่เสียหาย ซึ่งทำให้เสียเวลาในการผลิต ในงานวิจัยนี้ได้พัฒนาสูตรกระเบื้องดินเผาungหลังคาดูดซึมน้ำต่ำ และมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นจากเดิม โดยผลการวิจัยพบว่า สูตรกระเบื้องที่ใช้ดินเหนียวบ้านเบิก อ.ท่าม่วง จ.ลพบุรี เป็นวัตถุดิบหลัก และเศษแก้วเหลือทิ้งเป็นส่วนผสม ด้วยอัตราส่วนโดยน้ำหนัก $\text{Al}_2\text{O}_3 : \text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.30 โดยประมาณ ทำให้ได้กระเบื้องที่มีค่าการดูดซึมน้ำต่ำกว่าร้อยละ 1 หลังเผาที่ 1,150 องศาเซลเซียส และสามารถนำผลิตภัณฑ์ออกจากเตาได้ที่อุณหภูมิ 200 °C โดยไม่แตกร้าว และยังคงความแข็งแรงตาม มอก 158-2518

คำสำคัญ (Keyword) : กระเบื้องดินเผาungหลังคา กระเบื้องดูดซึมน้ำต่ำ เศษแก้ว

Development of Low Water Absorption Terracotta Roof Tile from Local Pottery Clay and Soda Lime Glass Cullet

*(Title both in Thai and in English must be concise and clearly convey what is done)

Apirat Theerapapvisetpong*

Department of Materials Science, Faculty of Science, Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand

Siriphan Nilpairach

Metal and Materials Science Research Institute, Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand

*Corresponding Author, Tel. 0-2218-5549, E-mail : apirat.t@chula.ac.th

Received DD MMMM YYYY; Accepted DD MMMM YYYY

DOI: 10.14416/j.kmutnb.YYYY.MM.NO.© 2015 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved

Abstract

A clay roof tile is a product which has been used for construction such as houses, temples, hotels as well as other cultural tourist attractions located around country. However, there are some disadvantages of installing the clay roof tile such as the high moisture adsorption, which leads to the growth algae causing black stain on tile. After firing process, it is necessary to wait until the temperature decreases lower than 200 °C to take the fired product out to prevent the damage, resulted in long time consuming. Moreover, the non-uniform in color and low strength may be counted as their drawback. In this study, we focus on developing the clay roof tile with low moisture adsorption and improved mechanical strength. The use of Banberg clay from Lopburi province as a raw material, incorporating with cullet with an Al_2O_3 : SiO_2 weight ratio of 0.30, lead to the reduction in moisture adsorption more than 1%, after firing at 1,150 °C. Moreover, the fired tile can be taken out of the furnace at 200 °C without cracking and maintains the strength according to TIS 158-2518.

Keywords: Terracotta roof tile, low water absorption tile, cullet.



1. บทนำ

ในบรรดาวัสดุก่อสร้าง กระเบื้องดินเผาungหลังคาเป็นอีกผลิตภัณฑ์หนึ่งที่มีกลุ่มผู้บริโภคกระจายอยู่ทั่วประเทศ เนื่องจากสามารถนำไปใช้กับสิ่งก่อสร้างที่หลากหลาย ได้แก่ หลังคาอุโบสถ หลังคาบ้านทรงไทย หลังคาอาคารสิ่งก่อสร้างที่มีสถาปัตยกรรมเชิงอนุรักษ์ อาคารร้านค้า โรงแรมและรีสอร์ท เป็นต้น สินค้ากลุ่มนี้เมื่อมีการสั่งซื้อจะมีคำสั่งซื้อในปริมาณมาก และยังมีการเติบโตของตลาดอย่างต่อเนื่อง กระเบื้องดินเผามุงหลังคาที่ใช้ดินเหนียวท้องถิ่นเพียงอย่างเดียวหรือดินเหนียวผสมเป็นวัตถุดิบหลักแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ กระเบื้องหลังคาที่ใช้ดินแดงผสมชนิดเคลือบ และกระเบื้องหลังคาที่ใช้ดินแดงผสมแบบไม่มีเคลือบ

ในกระบวนการผลิตของผู้ประกอบการขนาดเล็กยังไม่ได้ให้ความสำคัญกับสมบัติของกระเบื้องดินเผามุงหลังคา มาก เพียงเลือกใช้แหล่งดินผสมและผลิตกระเบื้องให้ความแข็งแรงในระดับที่ยอมรับได้หรือมอก. 158-2518 ได้กำหนดไว้ แต่เป็นมาตรฐานที่ไม่ได้นำมาบังคับใช้ ผลิตภัณฑ์ที่ไม่ได้คำนึงถึงระบบผลึกที่เกิดขึ้นหลังเผาและผู้ผลิตไม่ทราบกลไกการเปลี่ยนเฟสอาจทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดความเสียหายระหว่างผลิตได้ เช่น มีความแข็งแรงต่ำ บิดงอง่าย และเกิดเฟสคริสโตบาไลต์ (Cristobalite) ในเนื้อกระเบื้อง ทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดความเสียหายได้เมื่อเปิดประตูเตาที่อุณหภูมิสูง หรือมีอัตราการลดอุณหภูมิเร็วเกินไปในช่วงที่เกิดการเปลี่ยนเฟส เฟสดังกล่าวเกิดการแตกหักในระบบที่มีปริมาณซิลิกาอิสระสูง เมื่อหลอมเป็นเนื้อแก้วแล้วลดอุณหภูมิลงจะตกผลึกเป็นคริสโตบาไลต์ ดังนั้นหากควบคุมปริมาณอัตราส่วนระหว่าง $Al_2O_3:SiO_2$ ในสูตรดินปั้นโดยให้มีสัดส่วนสูงขึ้นเล็กน้อยจะทำให้ปริมาณซิลิกาอิสระลดลง

การใช้เศษแก้วเป็นส่วนผสมในการพัฒนาเนื้อกระเบื้องมีการวิจัยอย่างต่อเนื่อง ดังผลงานวิจัยที่ผ่านมาของ อภิรัฐและคณะ[1] ได้ผสมเศษแก้วโซดาไลม์กับเนื้อดินแดงและดินสโตนแวร์ พบว่าเพียงร้อยละ 10 ก็สามารถได้เนื้อเซรามิกดูดซึมน้ำต่ำกว่าร้อยละ 1 เมื่อเผา

ที่อุณหภูมิ 1125 – 1150 องศาเซลเซียส Kim และคณะ [2] พบว่าใช้ปริมาณเศษแก้วจากจอ LCD ร้อยละ 5 เผาที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียส สามารถลดค่าดูดซึมน้ำได้ต่ำกว่าร้อยละ 1 Youssef และคณะ[3] ใช้เศษแก้วปริมาณร้อยละ 10 ในเนื้อกระเบื้องบุผนัง เผาที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส ได้ค่าดูดซึมน้ำหลังเผาร้อยละ 8 นอกจากนี้การลดความชื้นสะสมในเนื้อกระเบื้องจะช่วยลดการเกิดคราบดำจากสาหร่ายต่าง ๆ ที่มักพบบนหลังคาบ้านที่ใช้วัสดุungหลังคาดูดซึมน้ำสูง อาทิ สาหร่ายสกุล Chlorella ซึ่งพบบริเวณคราบสีเขียวบนพื้นผิวกระเบื้องดินเผา อิฐ และซีเมนต์[4] ในงานของ A.F. Gualtieri พบว่าการใช้แก้วที่เหลืงจากชุมชนสามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบ[5] ในการผลิตกระเบื้องเนื้อสโตนแวร์ไฟต์ได้ ในขณะที่ A. Tucci และคณะ[6] รายงานเกี่ยวกับการใช้โซดาไลม์ (soda lime)ทดแทนการใช้โซเดียมเฟลด์สปาร์ (Na-feldspar) ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักทำให้ค่าการดูดซึมน้ำน้อยกว่าร้อยละ 0.5 แต่เผาที่อุณหภูมิสูงถึง 1,200 องศาเซลเซียส S. Maschio และคณะ [7] ได้ทดลองใช้เศษแก้วที่เป็นวัตถุดิบเหลือใช้จากโรงงานผลิตกระดาษและดินเหนียวมาเป็นวัตถุดิบสำหรับการทำกระเบื้องสโตนแวร์สีแดงโดยใช้กระบวนการเผาเร็ว (fast firing) ซึ่งใช้เตาเผาเพียง 50 นาที พบว่าต้องใช้ส่วนผสมแก้วถึงร้อยละ 28 ผสมกับดินแดงร้อยละ 30 เผาเกินอุณหภูมิ 1,120 องศาเซลเซียสจึงจะได้กระเบื้องสโตนแวร์เนื้อสีแดงที่มีคุณภาพผ่านมาตรฐาน และเฟสหลักในเนื้อกระเบื้องที่ตรวจพบได้แก่ ควอตซ์ อะนอร์ไทต์ และไดออบไซด์ ไม่พบการเกิดเฟสคริสโตบาไลต์

ในงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาการพัฒนาสูตรดินแดงแหล่งท้องถิ่นผสมกับเศษแก้วและวัตถุดิบอื่น เพื่อให้ได้เนื้อกระเบื้องที่มีสมบัติดูดซึมน้ำต่ำ และมีปริมาณเฟสคริสโตบาไลต์ต่ำเพื่อลดความเสียหายในช่วงเปิดเตาในขณะลดอุณหภูมิลง ทำให้น้ำผลิตภัณฑ์ออกจากเตาได้เร็วขึ้นรอบการเผาผลิตภัณฑ์ใช้เวลาสั้นลง



2.วิธีการวิจัย

ดินแดงที่เลือกศึกษานำมาใช้ในการพัฒนาเป็นสูตรกระเบื้องดินเผาungหลังคา ได้จากแหล่งดินที่มีการขุดหน้าดินและนำมากองสะสมเพื่อใช้ผลิตอิฐก่อสร้าง ในพื้นที่ตำบลบ้านเบิก อำเภอกำแพง จังหวัดลพบุรี วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค XRF ออกแบบส่วนผสมเนื้อดินปั้นโดยผสมกับวัตถุดิบอื่นเพื่อปรับปรุงองค์ประกอบเคมีให้มีอัตราส่วน $Al_2O_3:SiO_2$ อยู่ระหว่าง 0.278 – 0.308 และใช้เศษแก้วเพื่อลดการดูดซึมน้ำหลังเผา เตรียมตัวอย่างทดสอบด้วยการรีดเป็นแท่งทรงกระบอก เผาที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมงในเตาไฟฟ้า ทำการวัดการหดตัวก่อนและหลังเผา ตรวจสอบการดูดซึมน้ำทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดัดด้วยวิธี tree point bending ด้วยเครื่องทดสอบเอนกประสงค์ ทำการตรวจสอบการทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจับปล้นโดยนำตัวอย่างไปให้ความร้อนในเตาที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสแล้วนำออกจากเตาให้เย็นตัวในอากาศปกติ ตรวจสอบการแตกร้าวด้วยการจุ่มในสีย้อมสังเกตรอยแตกร้าวที่ผิวตัวอย่าง ทำการศึกษางค์ประกอบเฟสด้วยเครื่อง XRD (Bruker D8 Advanced) และเปรียบเทียบปริมาณเฟสผลึกในชิ้นงานด้วยด้วยเทคนิค Rietveld จากโปรแกรม TOPAS

3.ผลการวิจัย

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบด้วยเทคนิค XRF ดังแสดงในตารางที่ 1 จะเห็นว่าดินเหนียวบ้านเบิก เป็นดินที่มี SiO_2 ถึงประมาณร้อยละ 62 โดยน้ำหนัก Al_2O_3 ร้อยละ 19 โดยน้ำหนัก และสารช่วยลดอุณหภูมิการเผาทั้ง Na_2O K_2O CaO และ MgO รวมกันร้อยละ 4.7 โดยน้ำหนัก สารให้สีในดินเหนียวได้แก่ Fe_2O_3 5.49 โดยน้ำหนัก ดินขาวระนองถูกนำมาใช้เป็นส่วนผสมเป็นแหล่งให้ Al_2O_3 ซึ่งมีสูงถึงร้อยละ 32 โดยน้ำหนัก และในเฟลด์สปาร์เป็นตัวควบคุมและเติมเต็มส่วนผสมที่ขาด เช่นเดียวกับหินผุจากองค์ประกอบเคมีของวัตถุดิบดังกล่าวมา ได้สูตรดินปั้นสำหรับเตรียมตัวอย่างทดสอบดังตารางที่ 2 และ

เมื่อคำนวณองค์ประกอบเคมีในดินปั้นจะได้สัดส่วน $Al_2O_3:SiO_2$ อยู่ระหว่าง 0.278 – 0.308 ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของแหล่งดินและวัตถุดิบที่ใช้ในการเตรียมดินผสม (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

วัตถุดิบ	LB	ดินขาวระนอง	เฟลด์สปาร์	ควอตซ์	หินผุ	เศษแก้ว
Al_2O_3	19.3	32.38	18.09	0.18	16.72	1.1
SiO_2	61.7	42.21	66.56	98.81	76.64	61.39
Fe_2O_3	5.49	1.19	0.12	0.1	0.19	0.37
TiO_2	0.94	0.06	0.02	0.05	0.12	0.11
Na_2O	0.44	0.08	3.29	0.3	0.1	10.75
K_2O	2.21	2.43	11.3	0.07	0.19	0.31
CaO	0.84	0.06	0.26	0.1	0.1	9.27
MgO	1.41	0.13	0.03	0.1	0.1	4.04
LOI	7.46	21.45	0.34	0.3	5.84	12.66

ตารางที่ 2 สูตรเนื้อดินปั้น (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

วัตถุดิบ	LB0	LB-1	LB-2	LB-3
ดินบ้านเบิก	57.5	57.5	60.3	63.6
ดินขาวระนอง	19	16.5	13.5	10.1
เฟลด์สปาร์	0.6	1.2	1.4	1.5
ควอตซ์	5	5	5	5
หินผุ	7.9	9.8	9.8	9.8
เศษแก้ว	10	10	10	10

ตารางที่ 3 ปริมาณออกไซด์ในสูตรเนื้อดินปั้นที่ใช้ดินเหนียวบ้านเบิกเป็นวัตถุดิบหลัก (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

สูตร	LB0	LB-1	LB-2	LB-3
Al_2O_3	21.13	20.59	20.05	19.45
SiO_2	68.59	69.17	69.54	69.96
Fe_2O_3	3.44	3.39	3.49	3.61
TiO_2	0.67	0.66	0.69	0.72
Na_2O	1.49	1.51	1.51	1.52
K_2O	2.01	2.01	2.01	2.00
CaO	1.47	1.46	1.48	1.49
MgO	1.21	1.2	1.22	1.25
Al_2O_3 : SiO_2	0.308	0.298	0.288	0.278

ผลการตรวจสอบสมบัติก่อนเผาของตัวอย่างดินรีดและตากแห้งในตารางที่ 4 แสดงร้อยละการหดตัวและค่า



ความแข็งแรงต่อแรงดัด โดยเปรียบเทียบกับสูตร LB ซึ่งใช้ดินเหนียวบ้านเบ็กเพียงอย่างเดียว พบว่ามีค่าการหดตัวมากถึงร้อยละ 7.1 แต่เมื่อพิจารณาสูตร LB0 และ LB-1 ซึ่งเป็นสูตรที่นำดินเหนียวบ้านเบ็กมาผสมกับวัตถุเติมชนิดอื่น ๆ เพื่อปรับปรุงสมบัติต่าง ๆ พบว่ามีค่าการหดตัวคือ ร้อยละ 1.99 และ 3.36 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าลดลงจากสูตร LB อย่างชัดเจน ส่วนค่าความแข็งแรงพบว่ามีค่าลดลงจากสูตร LB LB0 และ LB-1 มีค่าความแข็งแรงลดลงจาก 4.19 3.73 และ 3.60 เมกะพาสคัล ตามลำดับ เนื่องจากปริมาณดินเหนียวในส่วนผสมลดลง ส่งผลให้วัสดุที่ทำหน้าที่ช่วยยึดเกาะของชิ้นงานก่อนเผามีปริมาณน้อยลง ผลการทดลองทดสอบสมบัติก่อนเผาของชิ้นงานสูตร LB-2 และ LB-3 พบว่ามีค่าการหดตัวก่อนเผามีค่าร้อยละ 4.04 และ 4.50 ตามลำดับ และมีค่าความแข็งแรงต่อแรงดัด 2.50 และ 2.18 เมกะพาสคัล ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าค่าการหดตัวก่อนเผาของชิ้นงานสูตร LB-2 และ LB-3 มีค่าสูงกว่าสูตร LB0 และ LB-1 จากการทดลองก่อนหน้านี้นี้ เนื่องจากทั้ง 2 สูตร มีการใช้ปริมาณดินเหนียวบ้านเบ็กเพิ่มขึ้น แต่มีค่าความแข็งแรงที่ลดน้อยลง

ตารางที่ 4 แสดงร้อยละการหดตัวและค่าความแข็งแรงต่อแรงดัดของตัวอย่างก่อนเผา

สูตร	การหดตัวเชิงเส้น (%)	ความแข็งแรงต่อแรงดัด (MPa)
LB	7.15 (±0.40)	4.19 (±0.27)
LB0	1.99 (±0.96)	3.73 (±0.67)
LB-1	3.36 (±1.42)	3.60 (±0.73)
LB-2	4.04 (±0.19)	2.50 (±0.24)
LB-3	4.50 (±0.25)	2.18 (±0.19)

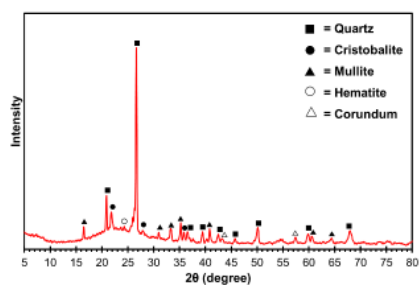
ในการทดลองชิ้นงานหลังเผาเบื้องต้นได้พิจารณาเพียงสูตร LB0 และ LB-1 โดยเผาที่อุณหภูมิ 1,150 องศาเซลเซียส และเทียบกับสูตร LB ผลการทดลองดังตารางที่ 5 เมื่อเผาชิ้นงานที่อุณหภูมิ 1,150 พบว่าสูตร LB LB0 และ LB-1 มีค่าการหดตัวหลังเผาเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 4.75 8.87 และ 9.24 ตามลำดับ และยังพบว่าค่าการดูดซึมน้ำของชิ้นงานสูตร LB0 และ LB-1 มีค่าร้อยละ 0.10 และ 0.04 ซึ่งเข้าใกล้ร้อยละ 0 และแตกต่างจากสูตร LB อย่าง

ชัดเจน ซึ่งสอดคล้องกับค่าการหดตัวเชิงเส้นหลังเผา ยิ่งไปกว่านั้นเมื่อพิจารณาค่าความแข็งแรงพบว่ามีค่าสูตร LB LB0 และ LB-1 มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 39.52 48.78 และ 50.55 เมกะพาสคัล ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิ 1,150 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิที่ทำให้เกิดการสุกตัวของสูตรเนื้อดินได้ดี เนื่องจากสัดส่วนของ $Al_2O_3 \cdot SiO_2$ ที่ลดลง โดยเฉพาะสูตรที่มีสัดส่วนของ $Al_2O_3 \cdot SiO_2$ น้อยที่สุด

ตารางที่ 5 สมบัติหลังเผาที่อุณหภูมิ 1,150 องศาเซลเซียส ของชิ้นงานที่เตรียมจากสูตรเนื้อดินปั้นโดยใช้ดินเหนียวบ้านเบ็กเป็นวัตถุดิบหลัก

สูตร	การหดตัวเชิงเส้น (%)	การดูดซึมน้ำ (%)	ความแข็งแรงต่อแรงดัด (MPa)
LB	4.75 (±0.11)	7.03 (±0.38)	39.52 (±2.80)
LB0	8.87 (±0.92)	0.10 (±0.16)	48.78 (±7.45)
LB-1	9.24 (±1.31)	0.04 (±0.10)	50.55 (±6.68)

ผู้วิจัยได้เลือกสูตร LB-1 ไปทดสอบสมบัติอื่น ๆ ได้ผลดังนี้ ผลการวิเคราะห์เฟสผลึกในตัวอย่างหลังเผาแสดงดังภาพที่ 1 พบว่ามีองค์ประกอบของควอตซ์ คริสโตบาไลต์ และมัลไลต์ นอกจากนั้นยังพบฮีมาไทต์ และคอร์ันดัมเล็กน้อย การตรวจพบปริมาณเฟสมัลไลต์ในชิ้นงานมีความสัมพันธ์กับการเพิ่มความแข็งแรงให้มีค่าสูงขึ้น โดยมัลไลต์เกิดจากการทำปฏิกิริยาของดินที่เป็นส่วนผสมในสูตรดินปั้น ณ อุณหภูมิสูง นอกจากนั้นเมื่อพิจารณาปริมาณของผลึกและออสันฐานด้วยการคำนวณพื้นที่ได้แผนภาพพบว่าปริมาณผลึกอยู่ร้อยละ 55 และปริมาณออสันฐานอยู่ร้อยละ 45 และเมื่อวิเคราะห์เชิงปริมาณของแต่ละชนิดที่อยู่ในรูปผลึกด้วยเทคนิค Rietveld พบว่ามีควอตซ์ร้อยละ 26.73 คริสโตบาไลต์ร้อยละ 4.43 มัลไลต์ร้อยละ 16.23 ฮีมาไทต์ร้อยละ 2.32 และคอร์ันดัมร้อยละ 5.77



ภาพที่ 1 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD ของเนื้อดินปั้นสูตร NLB-1 หลังเผาที่ 1,150 องศาเซลเซียส

เมื่อทดสอบค่าความต้านทานการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างเฉียบพลันที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส และตรวจสอบจากการแตกร้าวของชิ้นงานหลังการทดสอบด้วยการแช่สีย้อมและร้อยละค่าความแข็งแรงของกระเบื้องที่ลดลงหลังผ่านการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างเฉียบพลัน พบว่าหลังการทดสอบไม่พบรอยแตกที่ผิวของชิ้นงาน แสดงให้เห็นว่าชิ้นงานสูตร LB-1 หลังเผาที่ 1,150 องศาเซลเซียส มีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างเฉียบพลัน

4. สรุป

เนื้อดินปั้นกระเบื้องมุงหลังคาที่ใช้ดินบ้านเบิกอำเภอกำแพง จังหวัดลพบุรี เป็นหลักและปรับปรุงส่วนผสมด้วยดินขาว เฟลด์สปาร์ หินฟู ควอร์ต และเศษแก้ว พบว่าอัตราส่วน $\text{Al}_2\text{O}_3 : \text{SiO}_2$ มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความแข็งแรง โดยสูตรที่มีอัตราส่วน $\text{Al}_2\text{O}_3 : \text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.298 เป็นสูตรที่ให้ความแข็งแรงดีที่สุด มีการดูดซึมน้ำต่ำเพียง ร้อยละ 0.04 และให้ผลการทนต่อการเปลี่ยนแปลงความร้อนอย่างฉับพลันที่ 200 องศาเซลเซียสได้

5. กิตติกรรมประกาศ (ถ้ามี)

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนโดยสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ภายใต้ชุดโครงการ "การพัฒนาอุตสาหกรรมขนาดกลางและขนาดย่อม" สัญญาเลขที่ RDG60T0066

เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Theerapavisetpong and S. Nilpairach, "Utilization of glass cutting sludge and sanitary ware sludge in ceramic pressed bodies," in *Key Engineering Materials* vol. 659, ed. 2015, pp. 169-174.
- [2] K. Kim, K. Kim, and J. Hwang, "Characterization of ceramic tiles containing LCD waste glass," *Ceramics International*, Article vol. 42, no. 6, pp. 7626-7631, 2016.
- [3] N. F. Youssef, M. F. Abadir, and M. A. O. Shater, "Utilization of soda glass (cullet) in the manufacture of wall and floor tiles," *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 18, no. 12, pp. 1721-1727, 1998/11/01/ 1998.
- [4] G. d. S. Sandra, B. Patricia, and G. Patricia, "Phototrophic Biofilms on Exterior Brick Substrate," *Research & Reviews in BioSciences*, vol. 11, no. 2, pp. 1-10, 2016. Trade Science Inc
- [5] A. F. Gualtieri, "Development of Low-Firing B-Fluxed Stoneware Tiles," *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 92, no. 11, pp. 2571-2577, 2009.
- [6] A. Tucci, L. Esposito, E. Rastelli, C. Palmonari, and E. Rambaldi, "Use of soda-lime scrap-glass as a fluxing agent in a porcelain stoneware tile mix," *Journal of the European Ceramic Society*, Article vol. 24, no. 1, pp. 83-92, 2004.
- [7] S. Maschio *et al.*, "Fast firing of tiles containing paper mill sludge, glass cullet and clay," *Waste Management*, Article vol. 29, no. 11, pp. 2880-2885, 2009.

สัญญาเลขที่ RDG60T0066

ชื่อโครงการ การพัฒนาสูตรเนื้อกระเบื้องดินเผาungหลังคาดูดซึมน้ำดำโดยใช้เนื้อดินผสมเนื้อดินแดงท้องถิ่น

สรุปรายงานความก้าวหน้าครั้งที่ 3

ตาราง เปรียบเทียบ Output ที่เสนอในข้อเสนอโครงการและที่ดำเนินการได้จริงในรอบ 15 เดือน

Output		ในกรณีล่าช้า (ผลสำเร็จไม่ถึง 100%) ให้ท่าน ระบุสาเหตุและการแก้ไขที่ท่านดำเนินการ
กิจกรรมในข้อเสนอโครงการ/หรือจากการ ปรับเปลี่ยน	ผลสำเร็จ (%)	
1. ศึกษาข้อมูล	100%	-
2. เตรียมส่วนผสม	100%	-
3. ขึ้นรูปชิ้นงานและเผาในห้องปฏิบัติการ	100%	-
4. ตรวจสอบสมบัติและวิเคราะห์ผล	100%	-
5. ทดลองผลิตในโรงงาน	100%	-
6. ฝึกอบรมและเผยแพร่ผลงาน	100%	-
7. จัดทำรายงานและปิดโครงการ	100%	-

ลงนาม.....

(หัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน)

วันที่.....

ข้อคิดเห็นและข้อเสนอแนะอื่นๆ ต่อ สกว.

☒ ประชุม..... จำนวน ครั้ง

☒

☐

ลงนาม.....

(หัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน)

วันที่.....