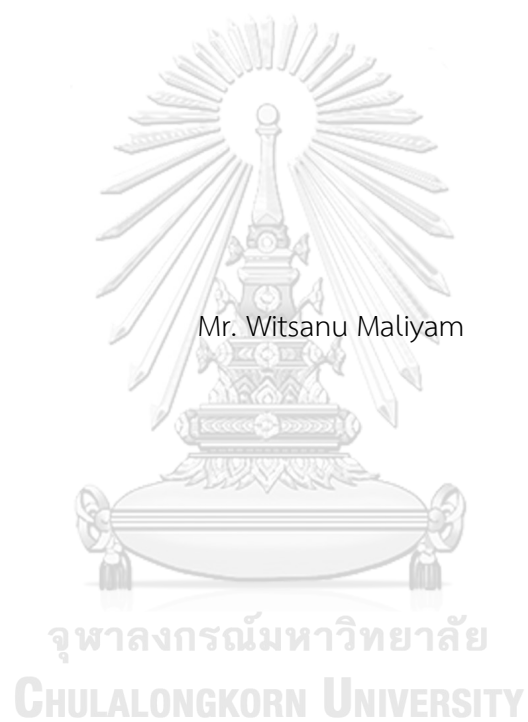


การเตรียมอิฐมวลเบาจากเถ้าลิกไนต์และสารก่อโฟม



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีเซรามิก ภาควิชาวัสดุศาสตร์
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2562
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PREPARATION OF LIGHTWEIGHT BRICK USING LIGNITE ASH AND FOAMING AGENT



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

Department of Materials Science

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2019

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเตรียมอิฐมวลเบาจากเถ้าลิกไนต์และสารก่อโฟม
โดย	นายวิชณุ มะลิแย้ม
สาขาวิชา	เทคโนโลยีเซรามิก
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนากร วาสนาเพียรพงศ์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ดร.จรัสพร มงคลขจิต

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของ
การศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	
.....	ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กานต์ เสรีวัลย์สถิตย์)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนากร วาสนาเพียรพงศ์)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ดร.จรัสพร มงคลขจิต)	
.....	กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันทนี พุกกะคุปต์)	
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.ปาจรีย์ ถาวรนิติ)	

วิชญ์ มะลิแย้ม : การเตรียมอิฐมวลเบาจากเถ้าถ่านหินและสารก่อโฟม. (PREPARATION OF LIGHTWEIGHT BRICK USING LIGNITE ASH AND FOAMING AGENT) อ.ที่
 ปรึกษาหลัก : ผศ. ดร.ธนากร วาสนาเพียรพงศ์, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ดร.จรัสพร มงคลขจิต

ในงานวิจัยนี้มีความสนใจในการนำเถ้าถ่านหินมาใช้ประโยชน์ จากการวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสของเถ้าหนัก พบว่าประกอบด้วยควอตซ์ อะนอร์ไทต์ แมกนีไทต์ และฮีมาไทต์ องค์ประกอบดังกล่าวสามารถนำมาใช้เติมแทนที่ดินราชบุรีได้ ร้อยละ 20 40 และ 60 โดยน้ำหนัก ในการผลิตอิฐดินมวลเบา เถ้าหนักและดินราชบุรีผสมกับปูนปลาสเตอร์ (แบบพิมพ์ปูนปลาสเตอร์ ใช้แล้วจากอุตสาหกรรมเซรามิก) ต่อโซเดียมซิลิเกตในอัตราส่วน 1:1 และฟองโฟม (สารก่อโฟม-โปรตีนจากพืช) ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยมือ ชิ้นงานทั้งหมดจะนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิต่างกัน ได้แก่ 40 65 และ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 2 และ 2 วัน ตามลำดับ และเผาชิ้นงานที่อุณหภูมิ 800 900 และ 1000 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อน 5 องศาเซลเซียสต่อนาที มีระยะเย็นไฟ 30 นาที สมบัติของชิ้นงานหลังเผารายงานผลเป็นความหนาแน่น และความต้านทานแรงอัด อ้างอิงตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคอนกรีตบล็อกมวลเบา มอก.2601-2556 จากผลการทดสอบพบว่าชิ้นงานในสูตร RL14 มีความหนาแน่น 1.16 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และความต้านทานแรงอัด 2.54 เมกะพาสคัล จากการเติมเถ้าถ่านหิน 60 โดยน้ำหนัก และเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ในขณะที่อุณหภูมิการเผา 1000 องศาเซลเซียส ของสูตร RL17F ประกอบด้วยการเติมเถ้าถ่านหิน 60 โดยน้ำหนัก และฟองโฟม ชิ้นงานมีความหนาแน่นเท่ากับ 1.12 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และความต้านทานแรงอัด 1.00 เมกะพาสคัล

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
 CHULALONGKORN UNIVERSITY

สาขาวิชา เทคโนโลยีเซรามิก

ปีการศึกษา 2562

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

6072100623 : MAJOR CERAMIC TECHNOLOGY

KEYWORD: Lightweight Clay Brick, Foaming Agent, Lignite Bottom Ash

Witsanu Maliyam : PREPARATION OF LIGHTWEIGHT BRICK USING LIGNITE ASH AND FOAMING AGENT . Advisor: Asst. Prof. THANAKORN WASANAPIARNPONG, Ph.D. Co-advisor: Charusporn Mongkolkachit, Ph.D.

This research interested in the utilization of lignite bottom ash. X-ray Diffraction (XRD) analysis indicated that the bottom ash composes various minerals e.g. quartz, anorthite, magnetite, and hematite. Such composition has a possibility in the production of lightweight clay brick (masonry brick). Ratchaburi clay was replaced by bottom ash of 20, 40 and 60 wt%. Bottom ash and Ratchaburi clay were mixed with gypsum powder (plaster mold waste from ceramic industry), sodium silicate with the weight ratio of 1:1 and added foaming agent (plant-derived protein concrete foaming agent). Samples forming was done by hand. All bricks were dried at various temperatures of 40, 65 and 110 °C for 3, 2 and 2 days, respectively. Samples were fired at a temperature of 800, 900 and 1000 °C, with a heating rate of 5 °C/min for 30 minutes. Firing properties of the bricks including bulk density and compressive strength were measured according to the Thai industrial standard of cellular lightweight concrete blocks, TIS. 2601-2013. This research showed that the samples of RL14 had bulk density of 1.16 g/cm³ and compressive strength of 2.54 MPa was obtained from the addition of 60 wt% of bottom ash replacement to clay and fired at 800 °C. At firing temperature of 1000 °C, the samples of RL17F consisted of 60 wt% of bottom ash and foaming agent, showed a bulk density of 1.12 g/cm³ and compressive strength of 1.00 MPa.

Field of Study: Ceramic Technology

Student's Signature

Academic Year: 2019

Advisor's Signature

Co-advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

สำหรับงานวิจัยและการเขียนเล่มวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ ข้าพเจ้า นายวิษณุ มะลิแย้ม ได้รับความเมตตากรุณาจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนากร วาสนาเพียรพงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ดร.จรัสพร มงคลขจิต อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้คำปรึกษาแนะนำและอบรมสั่งสอน ตลอดระยะเวลาในการทำวิจัย ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และคณาจารย์ทุกท่าน สำหรับการตรวจแก้ไขข้อบกพร่องของรูปเล่มวิทยานิพนธ์และคำแนะนำต่าง ๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้มีความถูกต้องและสมบูรณ์

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากสถาบันบัณฑิตวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีไทย (TGIST) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (NSTDA) ระดับปริญญาโท ปี 2560 ภายใต้สัญญาเลขที่ SCA-CO-2560-0070-TH เป็นระยะเวลา 2 ปี

ผู้วิจัยขอขอบคุณ หน่วยปฏิบัติการวิจัยเซรามิกขั้นสูง ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับเครื่องมือและอุปกรณ์การทำวิจัย ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ ที่ให้ความช่วยเหลือในการวิเคราะห์ทดสอบ ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ฝ่ายธุรการที่ให้ความอนุเคราะห์ช่วยเหลือด้านเอกสารธุรการเป็นอย่างดีตลอดการวิจัย

ผู้วิจัยขอขอบคุณ คุณอาวุธ ดวงดี ให้ความอนุเคราะห์คอมพิวเตอร์ในการเขียนเล่มวิทยานิพนธ์ ขอขอบคุณพี่น้องและเพื่อนสาขาเทคโนโลยีเซรามิก ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และทีมงานบูลลี่สตูดิโอ สาขาขอนแก่นและกรุงเทพฯ ที่คอยเป็นกำลังใจให้ คำปรึกษาและช่วยเหลือมาโดยตลอด สุดท้ายขอขอบพระคุณครอบครัว ได้แก่ คุณสมพร ศรสุนย์ และคุณเวียงสะไหม บุลม ประกอบกับบุคคลท่านอื่นในครอบครัวของผู้วิจัย ที่คอยให้การสนับสนุนทางด้านทุนทรัพย์ และเป็นกำลังใจให้ผู้วิจัยมาโดยตลอด

วิษณุ มะลิแย้ม

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูปภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 อิฐดินเผา	4
2.2 ประเภทของอิฐดินเผา.....	4
2.3 กระบวนการผลิตอิฐดินเผา	7
2.4 ดินสำหรับการผลิตอิฐดินเผา.....	9
2.5 องค์ประกอบที่มีผลต่อความเหนียวของดิน	10
2.6 กระบวนการอบแห้ง.....	12
2.7 กระบวนการที่เกิดขึ้นในระหว่างการเผา	16
2.8 สีที่เกิดหลังการเผา.....	18
2.9 สมบัติของอิฐดินเผา.....	19

2.10	มาตรฐานอุตสาหกรรมของอิฐดินเผา.....	20
2.11	คอนกรีตมวลเบา	21
2.12	อิฐดินเผามวลเบา.....	24
2.13	ถ่านหินเหมืองแม่เมาะ	25
2.14	ถ่านหินลิกไนต์.....	27
2.15	ปูนปลาสเตอร์.....	28
2.16	สารช่วยกระจายตัว.....	31
2.17	สารก่อโฟม.....	32
2.18	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	33
บทที่ 3	วิธีการดำเนินการวิจัย	41
3.1	วัตถุประสงค์และสารเคมี เครื่องมือและอุปกรณ์.....	41
3.2	การวิเคราะห์ของวัตถุประสงค์ตั้งต้น	43
3.3	การเตรียมวัตถุดิบและการออกแบบสูตรส่วนผสม	44
3.4	การขึ้นรูปชิ้นงาน การอบแห้งและการเผาชิ้นงาน	47
3.5	การทดสอบสมบัติทางกายภาพของชิ้นงาน.....	49
3.6	การวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของชิ้นงาน	52
บทที่ 4	ผลการดำเนินการวิจัย.....	58
4.1	ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี.....	58
4.2	ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเฟส.....	59
4.3	ผลการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของวัตถุประสงค์ตั้งต้น	59
4.4	การทดสอบความเหนียวของเนื้อดิน	60
4.5	การหัดตัวหลังอบแห้งของชิ้นงานสูตรอิฐมวลเบากลุ่มที่ 2.....	62
4.6	การหัดตัวหลังเผาของชิ้นงานสูตรอิฐมวลเบากลุ่มที่ 2	63
4.7	ความหนาแน่นของชิ้นงานสูตรอิฐมวลเบากลุ่มที่ 2.....	65

4.8 การดูซึม้ำของชิ้นงานสูตรอิฐมวลเบา	กลุ่มที่ 2	68
4.9 ความต้านทานแรงอัดของชิ้นงานสูตรอิฐมวลเบา	กลุ่มที่ 2	70
4.10 สีของชิ้นงานสูตรอิฐมวลเบา	กลุ่มที่ 2	72
4.11 การหดตัวหลังอบแห้งของชิ้นงานสูตรอิฐมวลเบา	กลุ่มที่ 3	76
4.12 การหดตัวหลังเผาของชิ้นงานสูตรอิฐมวลเบา	กลุ่มที่ 3	77
4.13 ความหนาแน่นของชิ้นงานสูตรอิฐมวลเบา	กลุ่มที่ 3	79
4.14 การดูซึม้ำของชิ้นงานสูตรอิฐมวลเบา	กลุ่มที่ 3	82
4.15 ความต้านทานแรงอัดของชิ้นงานสูตรอิฐมวลเบา	กลุ่มที่ 3	84
4.16 การนำความร้อนของชิ้นงานสูตรอิฐมวลเบา	กลุ่มที่ 3	87
4.17 สีของชิ้นงานสูตรอิฐมวลเบา	กลุ่มที่ 3	89
4.18 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสของสูตร	RL12 และสูตร RL14	94
4.19 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสของสูตร	RL15F และสูตร RL17F	97
4.20 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของสูตร	RL12 และสูตร RL14	100
4.21 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของสูตร	RL15F และสูตร RL17F	105
บทที่ 5	สรุปผลการวิจัย	110
5.1	สรุปผลการวิจัย	110
5.2	ข้อเสนอแนะ	112
บรรณานุกรม		113
ประวัติผู้เขียน		117

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 การจำแนกผลิตภัณฑ์อิฐดินเผาตามชั้นคุณภาพและขนาด.....	20
ตารางที่ 2.2 ความต้านทานแรงอัดและการดูดซึมน้ำของผลิตภัณฑ์อิฐดินเผาตามชั้นคุณภาพ.....	21
ตารางที่ 2.3 ชนิดและสมบัติของอิฐบล็อกมวลเบา.....	24
ตารางที่ 2.4 ขนาดของอิฐบล็อกมวลเบาที่กำหนดขนาดตามมาตรฐานอุตสาหกรรม.....	24
ตารางที่ 2.5 การเปรียบเทียบสมบัติของอิฐดินเผา อิฐบล็อกมวลเบาและอิฐดินเผามวลเบา.....	25
ตารางที่ 2.6 สมบัติของถ่านหินแอนทราไซต์ บิทูมินัส ซับบิทูมินัสและลิกไนต์.....	26
ตารางที่ 2.7 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าหนัก จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง.....	27
ตารางที่ 2.8 ความแตกต่างของปูนปลาสเตอร์แต่ละประเภท.....	29
ตารางที่ 2.9 การเปรียบเทียบสมบัติระหว่างปูนปลาสเตอร์ชนิดธรรมดา กับปูนปลาสเตอร์ซีเมนต์... ..	30
ตารางที่ 2.10 สมบัติทางกายภาพของอิฐมวลเบาที่มีเติมเยื่อกระดาษ.....	37
ตารางที่ 2.11 ความหนาแน่นและการดูดซึมน้ำของอิฐมวลเบาที่นำวัสดุเหลือใช้จากอิฐดินเผามาใช้ใน สัดส่วนที่ต่างกัน.....	37
ตารางที่ 2.12 ผลของอัตราส่วนระหว่างดินเบา ปูนขาว และยิปซัม ในอัตราส่วนต่างกันต่อสมบัติของ อิฐมวลเบา.....	38
ตารางที่ 3.1 รายละเอียดของวัตถุดิบและสารเคมี.....	41
ตารางที่ 3.2 รายละเอียดของเครื่องมือและอุปกรณ์.....	42
ตารางที่ 3.3 องค์ประกอบทางเคมีของปูนปลาสเตอร์กับสารละลายโซเดียมซิลิเกต.....	45
ตารางที่ 3.4 สูตรอิฐดินเผา.....	45
ตารางที่ 3.5 สูตรอิฐมวลเบากลุ่มที่ 2.....	46
ตารางที่ 3.6 สูตรอิฐมวลเบากลุ่มที่ 3.....	47

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของดินราชบุรี เถ้าหนักลิกไนต์และแบบพิมพ์ปูนปลาสเตอร์ใช้แล้ว	58
ตารางที่ 4.2 การกระจายขนาดอนุภาคที่ตำแหน่ง d50 ของวัตถุบ ได้แก่ ดินราชบุรี เถ้าหนักลิกไนต์ และปูนปลาสเตอร์.....	60
ตารางที่ 4.3 สัมประสิทธิ์ความเหนียวของเนื้อดินของสูตรอิฐดินเผา และอิฐมวลเบากลุ่มที่ 2 และ 3	61
ตารางที่ 4.4 การหัดตัวหลังอบแห้งของชิ้นงานสูตรอิฐมวลเบากลุ่มที่ 2 เปรียบเทียบกับสูตรอิฐดินเผา	62
ตารางที่ 4.5 การหัดตัวหลังเผาของชิ้นงานสูตรอิฐมวลเบากลุ่มที่ 2 เปรียบเทียบกับสูตรอิฐดินเผา .	64
ตารางที่ 4.6 ความหนาแน่นของชิ้นงานสูตรอิฐมวลเบากลุ่มที่ 2 เปรียบเทียบกับสูตรอิฐดินเผา.....	66
ตารางที่ 4.7 การดูดซึมน้ำของชิ้นงานสูตรอิฐมวลเบากลุ่มที่ 2 เปรียบเทียบกับสูตรอิฐดินเผา.....	68
ตารางที่ 4.8 ความต้านทานแรงอัดของชิ้นงานสูตรอิฐมวลเบากลุ่มที่ 2 เปรียบเทียบกับสูตรอิฐดินเผา	70
ตารางที่ 4.9 ค่า L_{a^*} และ b^* ของชิ้นงานสูตรอิฐดินเผาและสูตรอิฐมวลเบากลุ่มที่ 2	72
ตารางที่ 4.10 การหัดตัวหลังอบแห้งของชิ้นงานสูตรอิฐมวลเบากลุ่มที่ 3 เปรียบเทียบกับสูตรอิฐดินเผา.....	76
ตารางที่ 4.11 การหัดตัวหลังเผาของชิ้นงานสูตรอิฐมวลเบากลุ่มที่ 3 เปรียบเทียบกับสูตรอิฐดินเผา	77
ตารางที่ 4.12 ความหนาแน่นของชิ้นงานสูตรอิฐมวลเบากลุ่มที่ 3 เปรียบเทียบกับสูตรอิฐดินเผา....	80
ตารางที่ 4.13 การดูดซึมน้ำของชิ้นงานสูตรอิฐมวลเบากลุ่มที่ 3 เปรียบเทียบกับสูตรอิฐดินเผา.....	82
ตารางที่ 4.14 ความต้านทานแรงอัดของชิ้นงานสูตรอิฐมวลเบากลุ่มที่ 3 เปรียบเทียบกับสูตรอิฐดินเผา.....	85
ตารางที่ 4.15 การนำความร้อนของชิ้นงานสูตรอิฐมวลเบากลุ่มที่ 3 เปรียบเทียบกับสูตรอิฐดินเผา	87
ตารางที่ 4.16 ค่า L_{a^*} และ b^* ของชิ้นงานสูตรอิฐดินเผาและสูตรอิฐมวลเบากลุ่มที่ 3	90
ตารางที่ 5.1 สมบัติของอิฐมวลเบาสูตร RL14 และ RL17F เปรียบเทียบกับสมบัติของอิฐดินเผา มวลเบาและมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมอิฐบล็อกมวลเบา.....	112

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
ภาพที่ 2.1 อิฐก่อสร้างสามัญหรืออิฐมอญ	5
ภาพที่ 2.2 อิฐโปร่งหรืออิฐกลวง.....	5
ภาพที่ 2.3 อิฐประดับ.....	5
ภาพที่ 2.4 อิฐทนไฟ.....	6
ภาพที่ 2.5 อิฐขึ้นรูปด้วยมือ.....	6
ภาพที่ 2.6 อิฐขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดพิมพ์.....	7
ภาพที่ 2.7 อิฐขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดรีด.....	7
ภาพที่ 2.8 การเตรียมดิน.....	8
ภาพที่ 2.9 วัตถุประสงค์ความเหนียวของดิน ประกอบด้วย (ก) แกลบ และ (ข) เถ้าแกลบ	8
ภาพที่ 2.10 การตากอิฐให้แห้ง.....	9
ภาพที่ 2.11 การเผาอิฐ.....	9
ภาพที่ 2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและอัตราการให้ความเค้น	11
ภาพที่ 2.13 กระบวนการระเหยของน้ำหรือความชื้นภายในชิ้นงาน	13
ภาพที่ 2.14 การเปลี่ยนแปลงความชื้นภายในชิ้นงานระหว่างการอบแห้ง.....	14
ภาพที่ 2.15 อัตราการอบแห้งต่อหน่วยเวลา	15
ภาพที่ 2.16 กลไกที่เกิดขึ้นในกระบวนการเผาผนึก ประกอบด้วย (ก) ขั้นตอนเริ่มต้น (ข) ขั้นตอนกลาง และ (ค) กับ (ง) ขั้นตอนสุดท้าย	17
ภาพที่ 2.17 ลักษณะการเผาผนึก ประกอบด้วย (ก) การเผาผนึกแบบมีเฟสของเหลว และ (ข) การเผาผนึกแบบมีเฟสของแข็งเท่านั้น	18
ภาพที่ 2.18 ขนาดของอิฐก่อสร้างสามัญ.....	21
ภาพที่ 2.19 อิฐมวลเบาที่มีการเติมเม็ดโฟมแล้วเผาไล่ออก	22

ภาพที่ 2.20	อิฐบล็อกมวลเบาแบบกักฟองอากาศ.....	23
ภาพที่ 2.21	อิฐบล็อกมวลเบาแบบผ่านการอบไอน้ำภายใต้ความดันสูง.....	24
ภาพที่ 2.22	เก้าอี้ลิ้นไนด์ ประกอบด้วย (ก) เก้าอี้หนัก และ (ข) เก้าอี้ลอย	28
ภาพที่ 2.23	แบบพิมพ์ปูนปลาสเตอร์ใช้แล้ว	30
ภาพที่ 2.24	สมบัติของชิ้นงานที่มีการเติมเก้าอี้ลอยในอัตราส่วนต่างกันและเผาชิ้นงานที่อุณหภูมิ ต่างกัน ประกอบด้วย (ก) ค่าดูดซึมน้ำ และ (ข) ความแข็งแรง.....	34
ภาพที่ 2.25	สมบัติการหดตัวและความแข็งแรงของชิ้นงานของ ประกอบด้วย (ก) SEP-11-16 Chew Composite (ข) SEP-11-17 No B.A. และ (ค) SEP-11-18 15% B.A.	35
ภาพที่ 2.26	สมบัติของอิฐดินเผาที่มีการเติมเก้าอี้ลอยในอัตราส่วนต่างกัน ประกอบด้วย (ก) ความหนาแน่น และ (ข) ความต้านทานแรงอัด	36
ภาพที่ 2.27	ผลจากการเติมผงหินอ่อนต่อสมบัติของอิฐดินเผา ประกอบด้วย (ก) ความต้านทาน แรงอัด และ (ข) ความหนาแน่น	36
ภาพที่ 2.28	ผลของเก้าอี้ลอยต่อสมบัติทางกายภาพของอิฐดินเผามวลเบา ประกอบด้วย (ก) การดูดซึมน้ำ (ข) ความหนาแน่น (ค) ความต้านทานแรงอัด และ (ง) การนำความร้อน.....	39
ภาพที่ 2.29	อิฐดินเผามวลเบาสูตร ประกอบด้วย (ก) สูตร NB24 และ (ข) สูตร NB28	40
ภาพที่ 3.1	วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตอิฐดินเผาและอิฐมวลเบา ประกอบด้วย (ก) ดินราชบุรี (ข) เก้าอี้หนักลิ้นไนด์ และ (ค) แบบพิมพ์ปูนปลาสเตอร์ใช้แล้ว (บดหยาบ)	42
ภาพที่ 3.2	เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตอิฐดินเผาและอิฐมวลเบา ประกอบด้วย (ก) เครื่องปั้นผสมวัตถุดิบ (ข) เครื่องปั้นฟองโฟม และ (ค) แบบพิมพ์อะคริลิก	43
ภาพที่ 3.3	เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์ (X-ray diffractometer).....	43
ภาพที่ 3.4	เครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาค.....	44
ภาพที่ 3.5	เครื่องบดแบบสั่น (Vibratory mill) และหม้อบดแบบทั้งสแตนคาร์ไบด์.....	44
ภาพที่ 3.6	เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (Universal test machine).....	51
ภาพที่ 3.7	เครื่อง Pfefferkorn plasticity test และอุปกรณ์สำหรับเตรียมชิ้นงานทดสอบ	52
ภาพที่ 3.8	เครื่องโครมามิเตอร์ (Chroma meter).....	53
ภาพที่ 3.9	เครื่องวิเคราะห์การนำความร้อนด้วยเทคนิคฮอตดิสก์ (Hot-disk method).....	53

ภาพที่ 3.10	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	54
ภาพที่ 3.11	แผนผังการดำเนินการวิจัย	55
ภาพที่ 4.1	องค์ประกอบเฟสของเก้าหนักลิกันต์	59
ภาพที่ 4.2	การหัดตัวหลังอบแห้งของชิ้นงานสูตรอิฐดินเผาและสูตรอิฐมวลเบากลุ่มที่ 2	63
ภาพที่ 4.3	การหัดตัวหลังเผาของชิ้นงานสูตรอิฐดินเผาและสูตรอิฐมวลเบากลุ่มที่ 2	65
ภาพที่ 4.4	ความหนาแน่นของชิ้นงานสูตรอิฐดินเผาและสูตรอิฐมวลเบากลุ่มที่ 2	67
ภาพที่ 4.5	การดูดซึมน้ำของชิ้นงานสูตรอิฐดินเผาและสูตรอิฐมวลเบากลุ่มที่ 2	69
ภาพที่ 4.6	ความต้านทานแรงอัดของชิ้นงานสูตรอิฐดินเผาและสูตรอิฐมวลเบากลุ่มที่ 2	72
ภาพที่ 4.7	สีของชิ้นงานสูตรอิฐดินเผาและสูตรอิฐมวลเบากลุ่มที่ 2	74
ภาพที่ 4.8	ชิ้นงานสูตรอิฐดินเผาและสูตรอิฐมวลเบากลุ่มที่ 2	75
ภาพที่ 4.9	การหัดตัวหลังอบแห้งของชิ้นงานสูตรอิฐดินเผาและสูตรอิฐมวลเบากลุ่มที่ 3	77
ภาพที่ 4.10	การหัดตัวหลังเผาของชิ้นงานสูตรอิฐดินเผาและสูตรอิฐมวลเบากลุ่มที่ 3	79
ภาพที่ 4.11	ความหนาแน่นของชิ้นงานสูตรอิฐดินเผาและสูตรอิฐมวลเบากลุ่มที่ 3	82
ภาพที่ 4.12	การดูดซึมน้ำของชิ้นงานสูตรอิฐดินเผาและสูตรอิฐมวลเบากลุ่มที่ 3	84
ภาพที่ 4.13	ความต้านทานแรงอัดของชิ้นงานสูตรอิฐดินเผาและสูตรอิฐมวลเบากลุ่มที่ 3	87
ภาพที่ 4.14	การนำความร้อนของชิ้นงานสูตรอิฐดินเผาและสูตรอิฐมวลเบากลุ่มที่ 3	89
ภาพที่ 4.15	สีของชิ้นงานสูตรอิฐดินเผาและสูตรอิฐมวลเบากลุ่มที่ 3	92
ภาพที่ 4.16	ชิ้นงานสูตรอิฐดินเผาและสูตรอิฐมวลเบากลุ่มที่ 3	92
ภาพที่ 4.17	ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสของสูตร RL12 ประกอบด้วย (ก) ชิ้นงานก่อนเผา (ข) 800 องศาเซลเซียส และ (ค) 1000 องศาเซลเซียส	95
ภาพที่ 4.18	ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสของสูตร RL14 ประกอบด้วย (ก) ชิ้นงานก่อนเผา (ข) 800 องศาเซลเซียส และ (ค) 1000 องศาเซลเซียส	96
ภาพที่ 4.19	ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสของสูตร RL15F ประกอบด้วย (ก) ชิ้นงานก่อนเผา (ข) 800 องศาเซลเซียส (ค) 900 องศาเซลเซียส และ (ง) 1000 องศาเซลเซียส	98

ภาพที่ 4.20 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสของสูตร RL17F ประกอบด้วย (ก) ชิ้นงานก่อนเผา (ข) 800 องศาเซลเซียส (ค) 900 องศาเซลเซียส และ (ง) 1000 องศาเซลเซียส.....	99
ภาพที่ 4.21 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานก่อนเผาของสูตร RL12 (ก, ค และ จ) และสูตร RL14 (ข, ง และ ฉ)	101
ภาพที่ 4.22 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ของสูตร RL12 (ก, ค และ จ) และสูตร RL14 (ข, ง และ ฉ).....	102
ภาพที่ 4.23 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ของสูตร RL12 (ก, ค และ จ) และสูตร RL14 (ข, ง และ ฉ).....	103
ภาพที่ 4.24 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส ของสูตร RL12 (ก, ค และ จ) และสูตร RL14 (ข, ง และ ฉ).....	104
ภาพที่ 4.25 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานก่อนเผาของสูตร RL15F (ก, ค และ จ) และสูตร RL17F (ข, ง และ ฉ)	106
ภาพที่ 4.26 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ของสูตร RL15F (ก, ค และ จ) และสูตร RL17F (ข, ง และ ฉ)	107
ภาพที่ 4.27 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ของสูตร RL15F (ก, ค และ จ) และสูตร RL17F (ข, ง และ ฉ)	108
ภาพที่ 4.28 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส ของสูตร RL15F (ก, ค และ จ) และสูตร RL17F (ข, ง และ ฉ)	109
ภาพที่ 5.1 ชิ้นงานอิฐมวลเบาประกอบด้วย (ก) สูตร RL14 เผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส และ (ข) สูตร RL17F เผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส.....	112

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

อิฐดินเผา เป็นวัสดุที่สำคัญในระบบงานก่อสร้างหลายประเภท เช่น ตึก อาคาร เป็นต้น ระบบงานก่อสร้างในประเทศไทยพบการใช้อิฐกันอย่างแพร่หลาย มีความนิยมใช้มายาวนานตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน โดยสังเกตได้จากสิ่งปลูกสร้างโบราณสถานในอดีต เนื่องด้วยสมบัติในเรื่องความแข็งแรง การรับน้ำหนักได้ดี มีอายุการใช้งานยาวนาน อีกทั้งวัตถุดิบในการผลิตสามารถหาได้ง่ายในท้องถิ่น ยกตัวอย่างที่เห็นได้ชัดคือ อิฐก่อสร้างสามัญ หรืออิฐมอญ^[1] ซึ่งปรากฏอยู่ทั่วทุกภูมิภาคของประเทศ ตั้งแต่อุตสาหกรรมระดับครัวเรือนจนถึงการผลิตในระดับอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ แต่ในปัจจุบันผลิตภัณฑ์ประเภทอิฐดินเผากลับมีการพัฒนาและปรับปรุงสมบัติปรากฏให้เห็นไม่มากนัก จำนวนของงานวิจัยที่มีการตีพิมพ์และเผยแพร่ถือได้ว่ายังมีจำนวนน้อยเมื่อเทียบกับการพัฒนาผลิตภัณฑ์เซรามิกสำหรับงานก่อสร้างประเภทอื่น เช่น กระเบื้องปูพื้นหรือปูผนัง ผลิตภัณฑ์ทางคอนกรีต เป็นต้น^[1] ในงานวิจัยได้มุ่งเน้นการผลิตอิฐดินเผาของโรงงานส่วนใหญ่ในจังหวัดราชบุรี เริ่มต้นจากการหมักดินเหนียวผสมกับแกลบและน้ำในสัดส่วนที่พอเหมาะในบ่อหมักเพื่อให้ได้เนื้อดินแบบโคลนเหนียว ขึ้นรูปอิฐด้วยมือโดยการอัดในแบบพิมพ์ทรงสี่เหลี่ยม อิฐหลังขึ้นรูปต้องผ่านการผึ่งแดดให้แห้งเป็นเวลาอย่างน้อย 3-7 วัน ซึ่งปูพื้นด้วยแกลบ กลับด้าน ตกแต่งชิ้นงาน ผึ่งให้แห้ง และเผาอิฐเป็นเวลาประมาณ 15 วัน เพื่อเพิ่มความแข็งแรงและให้มีสมบัติหลังเผาโดยอาศัยเทคนิคความชำนาญของผู้ผลิตเอง^[2] อิฐดินเผาที่ผลิตได้จะมีน้ำหนักที่มากและความแข็งแรงสูงเมื่อเทียบกับอิฐมวลเบาที่มีขนาดเท่ากัน เนื่องด้วยความหนาแน่นภายในอิฐดินเผามีมากกว่าอิฐมวลเบา แต่น้ำหนักที่มากของอิฐกลับเป็นจุดด้อยในด้านการเตรียมโครงสร้างรองรับที่ต้องเผื่อน้ำหนักของอิฐที่กดทับ^[1, 2]

ในงานวิจัยมีความสนใจในการพัฒนาอิฐดินเผาแบบดั้งเดิมให้เป็นอิฐมวลเบาด้วยการปรับปรุงสัดส่วนของวัตถุดิบตั้งต้นที่ส่งผลให้วัสดุมีน้ำหนักที่เบาลงแต่คงความแข็งแรงตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมอิฐมวลเบา ให้มีสมบัติความเป็นฉนวนกันความร้อนที่เพิ่มเข้ามา ภายใต้ข้อจำกัดของต้นทุนวัตถุดิบและเทคโนโลยีในการผลิต ซึ่งอิฐดินเผาที่ผลิตได้ของโรงงานส่วนใหญ่ในจังหวัดราชบุรีปรากฏสมบัติความเป็นฉนวนกันความร้อนดังกล่าวน้อยมากเมื่อเทียบกับอิฐมวลเบาที่ผลิตจากโรงงานอื่น เนื่องด้วยความหนาแน่นในตัวอิฐดินเผาที่สูงกว่า ในการลดความหนาแน่นในอิฐดินเผาแบบดั้งเดิมให้เป็นอิฐมวลเบา โดยได้เลือกใช้วิธีการเติมฟองโพนซึ่งวิธีการเติมฟองโพนนิยมใช้ในการผลิตคอนกรีตบล็อกมวลเบาที่มีการใช้ซีเมนต์และคอนกรีตเป็นองค์ประกอบ เช่น อิฐบล็อก-

มวลเบา คอนกรีตมวลเบา เป็นต้น^[3] เนื่องด้วยเป็นวิธีที่มีค่าใช้จ่ายไม่สูงและเป็นไม่ต้องเผาไล่วัตถุดิบที่ทำให้ให้เกิดรูพรุนออก แต่ในทางกลับกันเนื้อดินตั้งต้นจากการหมักดินราชบุรีกับน้ำในสัดส่วนที่โรงงานกำหนดนั้นมีความเป็นไปได้ในการเตรียมอิฐมวลเบาด้วยวิธีการเติมฟองโฟมได้ยาก เนื้อดินมีลักษณะที่เหนียวและมีการไหลตัวต่ำมาก เมื่อทำการเติมฟองโฟมผสมกับเนื้อดินจะส่งผลต่อปริมาตรของฟองโฟมลดลงได้ ส่งผลให้มีจำนวนรูพรุนลดลงตามไปด้วย จากปัญหานี้ผู้วิจัยได้มีการปรับเปลี่ยนสัดส่วนของดินราชบุรีต่อน้ำให้มีสัดส่วนที่เหมาะสมต่อการเติมฟองโฟม เพื่อลดการหายไปของปริมาตรฟองโฟมและจำนวนรูพรุนไม่ลดตามไปด้วย

แบบพิมพ์ปูนปลาสเตอร์ใช้แล้วซึ่งมีองค์ประกอบของแร่ยิปซัม ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) เป็นองค์ประกอบหลัก^[4] ประกอบกับโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ซึ่งเป็นสารช่วยกระจายตัวที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมเซรามิก จากการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีและปฏิกิริยาระหว่างแบบพิมพ์ปูนปลาสเตอร์ใช้แล้วบดละเอียดกับสารละลายโซเดียมซิลิเกต ในอัตราส่วน 1:1^[5] ดังสมการที่ 1.1



พบว่าแคลเซียมซิลิเกต (CaSiO_3) ที่มีลักษณะเป็นโครงสร้างเจลที่เกิดขึ้นนั้น เป็นโครงสร้างที่พบได้ในการเตรียมวัสดุเซรามิกพรุนมวลเบา เช่น ผนังสำเร็จรูป ผลิตภัณฑ์ทางคอนกรีต เป็นต้น^[6] ด้วยข้อสมมติฐานในงานวิจัยเห็นว่า โครงสร้างเจลแคลเซียมซิลิเกตสามารถเปลี่ยนเนื้อดินให้มีลักษณะที่เป็นโคลนอ่อนได้ เป็นตัวช่วยกักฟองโฟมภายในชิ้นงาน และเพิ่มความพรุนตัวให้กับชิ้นงาน ประกอบกับโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) ที่มีจุดหลอมตัวต่ำเพียง 884 องศาเซลเซียส สามารถช่วยลดอุณหภูมิจุดสุกตัวในการเผาได้

การผลิตกระแสไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ^[7] จังหวัดลำปาง โดยการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ใช้ถ่านหินลิกไนต์เป็นเชื้อเพลิง ในการเผาไหม้ถ่านหินลิกไนต์จะเกิดผลผลิตพลอยได้เป็นถ่านลิกไนต์ประกอบด้วย ถ่านลอย ร้อยละ 80 และถ่านหนัก ร้อยละ 20 จากนโยบายของโรงไฟฟ้าแม่เมาะต้องการให้มีการนำถ่านลิกไนต์กลับมาใช้ประโยชน์เพื่อการจัดการถ่านลิกไนต์อย่างมีประสิทธิภาพ ในงานวิจัยนี้มีความสนใจในการนำถ่านลิกไนต์มาเป็นวัตถุดิบทดแทนบางส่วนของดินราชบุรีในการผลิตอิฐมวลเบา เนื่องด้วยองค์ประกอบหลักทางเคมีในถ่านลิกไนต์ ได้แก่ ซิลิกา (SiO_2) อะลูมินา (Al_2O_3) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) ซึ่งองค์ประกอบหลักทางเคมีข้างต้นสามารถทดแทนดินราชบุรีได้ และเฟอร์ริกออกไซด์ในถ่านลิกไนต์ที่มีมากกว่าในดินราชบุรีจะทำให้ชิ้นงานมีสีเข้มขึ้น ดังนั้นการนำถ่านลิกไนต์ แบบพิมพ์ปูนปลาสเตอร์ใช้แล้ว และโซเดียมซิลิเกต มาเป็นวัตถุดิบตั้งต้น และมีการเติมฟองโฟมในการเตรียมอิฐมวลเบา สามารถช่วยลดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติ และได้ผลิตภัณฑ์ใหม่สำหรับงานก่อสร้างที่มีความเหมาะสมกับเทคโนโลยีในการผลิตในประเทศอีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อพัฒนาอิฐดินเผาให้เป็นอิฐมวลเบาที่มีส่วนผสมของเถ้าหนักลิกไนต์และสารก่อโฟม และทดสอบสมบัติที่จำเป็นสำหรับใช้ในงานก่อสร้าง

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

อิฐมวลเบาได้จากการพัฒนาอิฐดินเผาที่ขึ้นรูปด้วยมือของโรงงานผลิตอิฐ จังหวัดราชบุรี โดยเติมเถ้าหนักลิกไนต์ทดแทนบางส่วนของดินราชบุรี เติมฟองโฟม โดยอาศัยปฏิกิริยาของแบบพิมพ์ปูนปลาสเตอร์ใช้แล้วบดละเอียดและสารละลายโซเดียมซิลิเกตในอัตราส่วน 1:1 เป็นตัวช่วยทำให้เนื้อดินมีลักษณะเป็นแบบโคลนอ่อนและกักฟองโฟม ทดสอบสมบัติทางกายภาพและวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของชิ้นงานอิฐมวลเบา อ้างอิงตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมอิฐบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ มอก.2601-2556

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้อิฐมวลเบาที่มีเถ้าหนักลิกไนต์และสารก่อโฟมเป็นส่วนผสมโดยมีสมบัติเทียบเท่ากับอิฐมวลเบาในท้องตลาด

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 อีฐดินเผา

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมอีฐก่อสร้างสามัญ มอก.77-2545 ได้ให้ความหมายของอีฐดินเผา หมายถึง อีฐที่ใช้ในงานโครงสร้างและไม่ใช่ในงานโครงสร้างโดยไม่มีวัตถุประสงค์จะเผาผึ่งเนื้อหรือผิว อีฐทำจากดิน ดินดาน อาจมีส่วนผสมของวัตถุดิบอื่น มีลักษณะเป็นทรงสี่เหลี่ยม ต้องมีการเผาเพื่อให้เกิดความแข็งแรงและความทนทาน ใช้ในงานก่อสร้างทั่วไป เช่น งานก่อผนังหรือกำแพง เป็นต้น และต้องมีการฉาบปูน^[8] อีฐจะมีสีส้มอ่อนไปจนถึงสีน้ำตาล ซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิการเผาและองค์ประกอบของดินที่นำมาใช้ แต่ในบางพื้นที่ที่มีการผลิตอีฐดินเผาจะพบว่าผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้นั้นมีคุณภาพที่ไม่สม่ำเสมอหรือมีคุณภาพที่แตกต่างออกไปจากผู้ผลิตรายอื่น หากการพัฒนาและการตรวจสอบคุณภาพตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมของอีฐดินเผาในแต่ละพื้นที่เป็นไปในทิศทางเดียวกันได้นั้น จะสะดวกต่อการพัฒนาผลิตภัณฑ์เพื่อการต่อยอด และได้ผลิตภัณฑ์ตรงตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม เมื่อนำไปใช้งานจะส่งผลให้มีประสิทธิภาพที่ดีตามมาด้วย

2.2 ประเภทของอีฐดินเผา

ประเภทของอีฐดินเผาที่พบในประเทศไทยสามารถจำแนกตามประโยชน์การใช้งานและตามวิธีการขึ้นรูป^[1, 9, 10] ดังนี้

2.2.1 แบ่งตามประโยชน์การใช้งาน ได้แก่

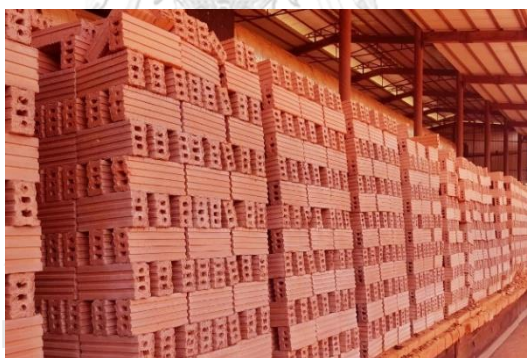
- 1) อีฐก่อสร้างสามัญหรืออีฐมอญ ดังแสดงในภาพที่ 2.1 เป็นอีฐที่ทำจากดินเหนียวผสมกับแกลบ หรือวัตถุดิบอื่น เช่น ทราย ชี้เลื้อย เป็นต้น และผสมกับน้ำในสัดส่วนที่พอเหมาะในบ่อหมัก จากนั้นนวดเคล้าจนเป็นเนื้อเดียวกัน ขึ้นรูปด้วยมือโดยเข้าแบบพิมพ์ทรงสี่เหลี่ยม โดยปูพื้นด้วยแกลบบนพื้นรองก่อนตากอีฐและภายในแบบพิมพ์ก่อนขึ้นรูปเพื่อป้องกันไม่ให้เนื้อดินติดไปกับแบบพิมพ์ อีฐหลังขึ้นรูปจะถูกนำไปผึ่งแดดให้แห้ง กลับด้านตากแห้งขึ้นงาน แล้วเผาอีฐเป็นเวลาประมาณ 15 วัน โดยอาศัยเทคนิคความชำนาญของผู้ผลิต
- 2) อีฐโปรงหรืออีฐกลวง เป็นอีฐประเภทกึ่งที่มีส่วนผสมในการผลิตเช่นเดียวกับอีฐก่อสร้างสามัญ แต่ไม่นิยมเติมทรายหรือแกลบ แต่ภายในจะเจาะรูหรือทำช่องภายในให้กลวงเพื่อให้มีน้ำหนักที่เบาขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 2.2

3) อิฐประดับ เป็นอิฐที่มีการผลิตด้วยเศษหิน กรวด ทราวยสีต่าง ๆ ซีเมนต์ และ สารเคมีบางชนิด ผสมกันแล้วอัดด้วยเครื่องอัด แต่การขึ้นรูปอาจใช้แบบพิมพ์ขึ้นรูปตาม รูปแบบที่ต้องการของผู้ผลิต ดังแสดงในภาพที่ 2.3

4) อิฐทนไฟ^[11] ดังแสดงในภาพที่ 2.4 เป็นอิฐที่มีส่วนประกอบของอะลูมินาใน ปริมาณสูง มีการเผาที่อุณหภูมิสูง ทำให้มีขนาดคงตัวและไม่หดตัวที่อุณหภูมิสูง ทนต่อการกัด สี การกัดกร่อน และทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลัน ใช้งานสำหรับก่อผนังเตา



ภาพที่ 2.1 อิฐก่อสร้างสามัญหรืออิฐมอญ^[12]



ภาพที่ 2.2 อิฐโปร่งหรืออิฐกลวง^[12]



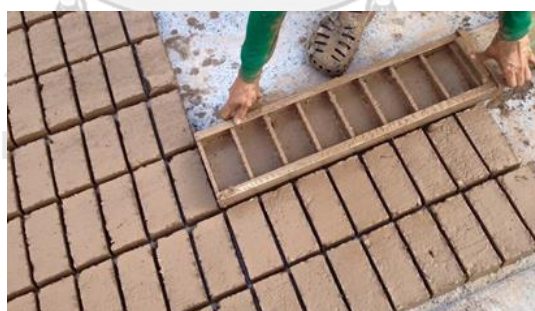
ภาพที่ 2.3 อิฐประดับ^[13]



ภาพที่ 2.4 อิฐทนไฟ^[14]

2.2.2 แบ่งตามวิธีการขึ้นรูป ได้แก่

1) อิฐขึ้นรูปด้วยมือ ดังแสดงในภาพที่ 2.5 เป็นอิฐที่ขึ้นรูปด้วยเนื้อดินที่มีความเหนียวไม่น้อยหรือแข็งจนเกินไป อัตราส่วนของน้ำในเนื้อดินที่เหมาะสมต่อการขึ้นรูปประมาณ ร้อยละ 25-30 ข้อด้อยของอิฐที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยมือมักมีขนาดของอิฐแต่ละก้อนที่ขนาดไม่เท่ากัน โดยความคลาดเคลื่อนมีสาเหตุจากหลากหลายประการ เช่น แบบพิมพ์ไม่เท่ากัน การอัดเนื้อดินเข้าในแบบพิมพ์ไม่แน่น การหดตัวของอิฐไม่สม่ำเสมอ เป็นต้น แต่สามารถใช้งานก่อสร้างได้ปกติ และยังเป็นที่ยอมรับใช้กันจนถึงปัจจุบัน ในประเทศไทยสามารถพบแหล่งผลิตอิฐดินเผาที่มีการขึ้นรูปด้วยมือ เช่น พระนครศรีอยุธยา อ่างทอง ราชบุรี สิงห์บุรี เป็นต้น



ภาพที่ 2.5 อิฐขึ้นรูปด้วยมือ

2) อิฐขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดพิมพ์ ดังแสดงในภาพที่ 2.6 เป็นอิฐที่อัดด้วยเครื่องอัดแรงอัดไฮดรอลิก (Hydraulic press) อิฐจะมีความหนาแน่นอย่างสม่ำเสมอ เป็นกรรมวิธีการผลิตที่ดีกว่าการขึ้นรูปอิฐด้วยมือ แบบอัดของอิฐประเภทนี้นิยมใช้เป็นแบบเหล็กจึงส่งผลให้อิฐมีขนาดที่สม่ำเสมอ ในประเทศไทยสามารถพบแหล่งผลิตอิฐดินเผาที่มีการขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดพิมพ์ เช่น พระนครศรีอยุธยา อ่างทอง เป็นต้น



ภาพที่ 2.6 อิฐขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดพิมพ์^[13]

3) อิฐขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดรีด ดังแสดงในภาพที่ 2.7 เป็นอิฐที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดรีด (Extruder) โดยการอัดรีดดินผ่านหัวแบบ โดยผู้ผลิตส่วนใหญ่จะออกแบบให้มีรูเกิดขึ้นในตัวอิฐตลอดแนวความยาวของเครื่องอัดรีด โดยจะมีตั้งแต่ 2-4 รู หรือขึ้นอยู่กัแบบที่ใช้และความต้องการของลูกค้าหรือผู้ผลิตเอง ในประเทศไทยสามารถพบแหล่งผลิตอิฐดินเผาที่มีการขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดรีด เช่น ชลบุรี ราชบุรี เป็นต้น



ภาพที่ 2.7 อิฐขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดรีด

2.3 กระบวนการผลิตอิฐดินเผา

กระบวนการผลิตอิฐดินเผา^[1, 9, 10] สามารถแบ่งขั้นตอนในการผลิต ดังนี้

2.3.1 การเตรียมดิน ดินเป็นวัตถุดิบหลักที่สำคัญในการผลิตอิฐดินเผา ซึ่งดินที่ใช้ในการเตรียมเป็นดินเหนียวจากท้องถิ่นหรือบริเวณริมบึง โดยดินเหนียวจะคัดแยกสิ่งเจือปนออก แล้วนำไปหมักกับน้ำในสัดส่วนที่พอเหมาะในบ่อหมักโดยใช้เวลา 2-3 วัน ดังแสดงในภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 การเตรียมดิน^[1]

2.3.2 การเติมวัตถุติบอื่น เช่น แกลบ (ภาพที่ 2.9 (ก)) ถั่วแกลบ (ภาพที่ 2.9 (ข)) หรือทราย เป็นต้น เพื่อลดความเหนียวของดินลงให้สามารถขึ้นรูปได้ ในขั้นตอนนี้อาจจะเติมหรือผสมไปพร้อมกับดินก่อนหมักหรือเติมหลังจากดินผ่านการหมักก็ได้ โดยทั่วไปจะเติมไม่เกินร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เพราะถ้าเติมในปริมาณที่มากจะส่งผลให้เนื้อดินขึ้นรูปได้ยาก และอาจส่งผลต่อความแข็งแรงของอิฐหลังเผาได้



(ก)

(ข)

ภาพที่ 2.9 วัตถุติบลดความเหนียวของดิน ประกอบด้วย (ก) แกลบ และ (ข) ถั่วแกลบ

2.3.3 การขึ้นรูปอิฐ อิฐที่ขึ้นรูปโดยใช้เครื่องอัดรีด ลักษณะของอิฐจะมีรูตามหัวรีดซึ่งการขึ้นรูปวิธีนี้จะทำให้สามารถผลิตอิฐได้เร็วและได้จำนวนมากกว่าวิธีอื่น เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการขึ้นรูปโดยใช้แบบพิมพ์อัดด้วยแรงอัดจากเครื่องอัดไฮดรอลิก และได้มากกว่าวิธีขึ้นรูปด้วยมือในแบบพิมพ์รูปทรงสี่เหลี่ยมที่ใช้แรงงานคนในการอัดขึ้นรูป ดังแสดงในภาพที่ 2.5-2.7

2.3.4 การตากอิฐให้แห้ง อิฐหลังจากขึ้นรูปจะถูกลำเลียงไปตากให้แห้งโดยใช้แสงแดดเป็นเวลา 3-7 วัน โดยปูพื้นด้วยแกลบ หรือวัตถุติบอื่น ดังแสดงในภาพที่ 2.10 เพื่อลดการหดตัวของอิฐที่ส่งผลต่อการแตกร้าวของตัวอิฐและขนาดไม่ตรงตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

กลับด้านอิฐ ตกแต่งชิ้นงานให้มีความสวยงาม ในขั้นตอนนี้เมื่อพบชิ้นงานที่เกิดการแตกร้าวเสียหาย จะถูกคัดแยกแล้วนำไปบดและหมักรวมกับดินในบ่อหมักอีกครั้ง



ภาพที่ 2.10 การตากอิฐให้แห้ง^[15]

2.3.5 การเผาอิฐ หลังจากขั้นตอนการตากอิฐให้แห้ง อิฐที่มีความสมบูรณ์หรือเสียหายไม่มากจะถูกลำเลียงเข้าเตาเผา โดยเรียงอิฐให้มีช่องว่างระหว่างแถวสำหรับเติมเชื้อเพลิงได้ ดังแสดงในภาพที่ 2.11 โดยทั่วไปเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาอิฐ ได้แก่ ฟืน หรือแกลบ เผาเป็นระยะเวลาประมาณ 7-14 วัน จนอิฐสุกตัวหรือมีสมบัติหลังเผาตามความต้องการของผู้ผลิตโดยอาศัยเทคนิคความชำนาญของผู้ผลิตเอง



ภาพที่ 2.11 การเผาอิฐ

2.4 ดินสำหรับการผลิตอิฐดินเผา

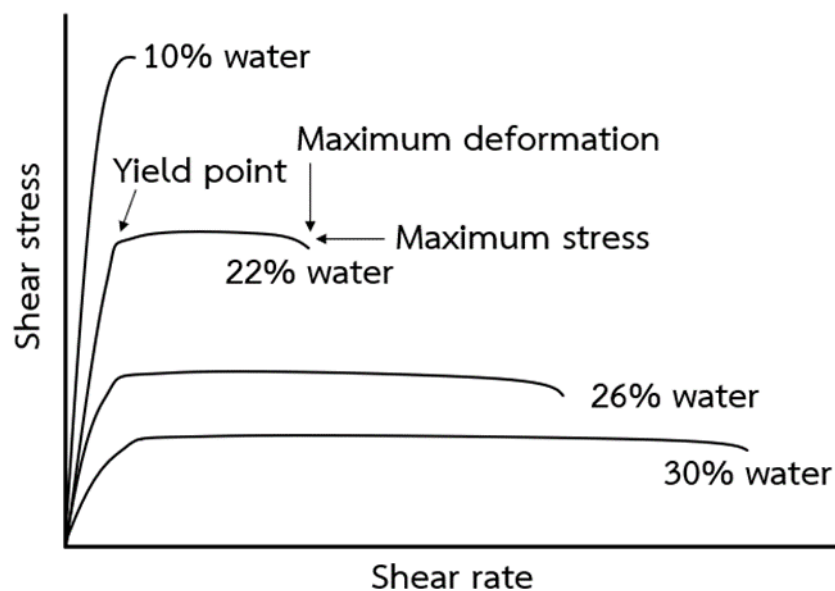
ดินสำหรับผลิตอิฐดินเผาส่วนใหญ่เป็นดินเหนียว โดยลักษณะทางกายภาพของดินเหนียวพบว่าดินเหนียวบางแหล่งมีทรายปนในดินอยู่ในปริมาณมาก บางแหล่งมีความเหนียวและมีเนื้อดินที่ละเอียด ปริมาณของแร่ในดินเหนียวแต่ละแหล่งจะมีความแตกต่างกัน โดยปกติองค์ประกอบของแร่ในดินเหนียวประกอบด้วย เคโอลินไนท์ ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) ไมกา ($\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{F},\text{OH})_2$) ควอตซ์ (SiO_2) เฟลด์สปาร์ ($(\text{Na},\text{K})\text{AlSi}_3\text{O}_8$) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) อีกทั้งมีองค์ประกอบทางเคมีประกอบด้วย แคลเซียมออกไซด์ (CaO) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) โซเดียมออกไซด์ (Na_2O) และโพแทสเซียม-

ออกไซด์ (K_2O) สัดส่วนขององค์ประกอบทางเคมีที่ต่างกันส่งผลให้เนื้อดินแต่ละชนิดเผาสุกตัวที่อุณหภูมิแตกต่างกัน มีสีของชิ้นงานหลังเผาแตกต่างกัน ในเนื้อดินที่มีแร่เหล็กประเภทออกไซด์ ส่งผลให้เนื้อดินหลังเผามีสีส้มแดง ในเนื้อดินที่มีแร่ประเภทซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) จะส่งผลให้เกิดตำหนิแบบจุดในชิ้นงาน ถ้าในเนื้อดินที่มีปริมาณของหินปูน ($CaCO_3$) มากกว่าร้อยละ 30 เมื่อเผาที่อุณหภูมิต่ำกว่า 800 องศาเซลเซียส ดินจะเกิดการยุบตัวหลังเผา เนื่องจากยวสารประกอบของแคลเซียมเกิดการสลายตัวในรูปผลึกที่อุณหภูมิดังกล่าว เพื่อป้องกันการยุบตัวของชิ้นงาน ควรออกแบบการเผาชิ้นงานในช่วงอุณหภูมิ 900-1050 องศาเซลเซียส ยกตัวอย่างเช่น การเผาเนื้อดินเทรราคอตตา (Terracotta) เพราะเกลือของแคลเซียมจะเกาะรวมตัวกับซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) ที่อุณหภูมิมากกว่า 900 องศาเซลเซียส แต่ถ้าอุณหภูมิจากเผาเกิน 1100 องศาเซลเซียส หินปูนในเนื้อดินจะทำหน้าที่เป็นตัวหลอมละลาย ซึ่งส่งผลให้ชิ้นงานหรืออิฐที่ทำจากดินเหนียวมีการหดตัวมาก ชิ้นงานจะมีขนาดเล็กลงไม่ได้ขนาดตามมาตรฐาน ยิปซัม ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) เป็นแร่ที่พบได้บ่อยในดินเหนียว โดยจะเปลี่ยนรูปผลึกเป็นแคลเซียมซัลเฟตเฮมิไฮเดรต ($CaSO_4 \cdot 0.5H_2O$) ที่อุณหภูมิมากกว่า 120 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิมากกว่า 600 องศาเซลเซียส จะเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของแอนไฮไดรต์ ($CaSO_4$) ที่ไม่มีน้ำอยู่ในโครงสร้าง และแคลเซียมซัลเฟตจะเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิมากกว่า 1200 องศาเซลเซียส แต่เนื่องจากในดินเหนียวมีสารมลทินในปริมาณที่สูงจึงทำให้เนื้อดินสามารถเกิดการหลอมตัวได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 1200 องศาเซลเซียส การเผาเนื้อดินจะต้องระวังในเรื่องของการใช้เชื้อเพลิงที่มีความบริสุทธิ์ และเผาในบรรยากาศออกซิเดชัน (Oxidation) ถ้าใช้เชื้อเพลิงถ่านหินที่มีแก๊สซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) เจือปนในการเผาไหม้จะส่งผลทำให้เกิดปฏิกิริยาที่ผิวของชิ้นงานเป็นเกลือซัลเฟตได้ การเกิดเกลือซัลเฟตจะเริ่มก่อตัวในช่วงอุณหภูมิ 600-800 องศาเซลเซียส^[16, 17]

2.5 องค์ประกอบที่มีผลต่อความเหนียวของดิน

ความเหนียวของดินเป็นสมบัติที่ทำให้ดินสามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ เมื่อบั่นดินได้รูปทรงตามที่ต้องการยังสามารถรักษารูปทรงนั้นไว้โดยไม่เสียรูปหรือยุบตัว จากภาพที่ 2.12 ค่าจุดคราก (Yield point) เป็นค่าที่ใช้ในการบ่งบอกถึงจุดเริ่มต้นของการเปลี่ยนรูปทรงที่ไม่สามารถคืนรูปได้ จะขึ้นอยู่กับอัตราของแรงที่ให้ ถ้าให้ด้วยแรงที่มีอัตราเร็วสูงจะส่งผลให้ค่าจุดครากเกิดขึ้นได้เร็ว ทำให้ไม่สามารถแก้ไขรูปทรงได้ แต่ในทางกลับกันถ้าให้แรงอย่างช้า ๆ ยกตัวอย่างเช่น การค่อย ๆ บั่นดินให้ได้รูปทรง ซึ่งจะทำให้สามารถแก้ไขรูปทรงได้ตามต้องการ สามารถคืนรูปได้ เนื่องจากดินยังไม่ถึงค่าจุดคราก การสูญเสียรูปสูงสุด (Maximum deformation) เป็นค่าที่สามารถเปลี่ยนแปลงรูปทรงได้โดยยังไม่เกิดการแตกหักเสียหาย และค่าความเค้นสูงสุด (Maximum stress) เป็นค่าที่มีความสำคัญ

สำหรับการขึ้นรูป เนื่องด้วยเป็นตัวแปรที่ต้องควบคุมให้ชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปไม่เกิดการเสียทรง แต่สำหรับการขึ้นรูปด้วยมือจะต้องคำนึงถึงตัวแปรของเวลา^[16]



ภาพที่ 2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและอัตราการให้ความเค้น^[18]

2.5.1 ปัจจัยที่ผลต่อความเหนียวของดิน^[16, 19] ได้แก่

1) ขนาดและรูปร่างของอนุภาค อนุภาคของดินที่มีความละเอียดมากจะมีความเหนียวที่มากกว่าอนุภาคที่มีความหยาบ และอนุภาคที่มีรูปทรงที่ไม่เป็นระเบียบจะมีความเหนียวที่มากกว่าอนุภาคที่มีรูปเป็นทรงลูกบาศก์หรือทรงกลม เนื่องจากอนุภาคที่มีความละเอียดและรูปทรงไม่เป็นระเบียบจะมีพื้นที่ผิวสัมผัสมากกว่า

2) การเติมของเหลวที่มีประจุและความหนืด การใช้ของเหลวที่มีประจุและความหนืดมากผสมจะช่วยให้มีดินมีความเหนียวเพิ่มขึ้น

3) ชนิดและปริมาณของไอออนที่ถูกดูดซับบนผิวดิน ยกตัวอย่างเช่น ดินที่มีการดูดซับของไฮโดรเจนไอออน (H^+) หรือแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) อยู่บนผิวจะมีความเหนียวกว่าดินที่มีการดูดซับของโซเดียมไอออน (Na^+) เนื่องจากอนุภาคของดินเป็นประจุลบ สามารถดึงประจุบวกที่บริเวณผิวซึ่งมีความแข็งแรงน้อย เมื่อผ่านลงไปในพื้นที่อิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) ที่เหมาะสม ไอออนบวกก็สามารถเข้ามาแทนที่ได้ แคลเซียมไอออนที่ถูกดูดซับบริเวณพื้นผิวสามารถถูกแทนที่ด้วยโซเดียมไอออนได้ เมื่อทำการเติมโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ลงในน้ำดินส่งผลให้ลักษณะทางกายภาพของน้ำดินเกิดการกระจายตัว (Deflocculant) และความ

เหนียวของดินลดลง ในขณะที่ไอออนของแคลเซียมไอออน แมกนีเซียมไอออน (Mg^{2+}) หรือ อะลูมิเนียมไอออน (Al^{3+}) จะเป็นตัวช่วยให้เกิดการจม (Flocculation) และความเหนียวของดินเพิ่มขึ้น

4) สารอินทรีย์ สังเกตได้ว่าดินดำจะมีความความเหนียวมากกว่าดินขาว เนื่องจากดินดำมีส่วนประกอบของสารอินทรีย์ปนอยู่มาก ในการขึ้นรูปวัตถุที่บดที่ไม่มีความเหนียว มักจะใช้แป้งกาวและซีเมนต์เป็นตัวช่วยให้เกิดความเหนียว

5) การนวดและการหมัก เนื่องจากการหมักดินกับน้ำจะทำให้เกิดการรวมตัวกันได้ดี และได้ทั่วถึง

2.6 กระบวนการอบแห้ง

ในกระบวนการขึ้นรูปชิ้นงานเซรามิกส่วนมากโดยเฉพาะในเซรามิกแบบดั้งเดิมจะใช้น้ำเป็นองค์ประกอบสำคัญ ดังนั้นในกระบวนการอบแห้งมีความสำคัญอย่างมากในทางอุตสาหกรรมเซรามิก เมื่อชิ้นงานสามารถอบแห้งได้เร็ว ระยะเวลาในการผลิตจะลดลงตาม แต่การทำให้ชิ้นงานแห้งเร็วมากจะส่งผลให้เกิดปัญหาการหดตัวที่ไม่สม่ำเสมอ ทำให้ชิ้นงานแตกเสียหายในระหว่างกระบวนการอบแห้ง โดยประเภทของน้ำในชิ้นงานเซรามิก และกลไกในกระบวนการอบแห้ง^[16,20,21] สามารถอธิบายได้ดังนี้

2.6.1 น้ำในชิ้นงานเซรามิก สามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่

1) น้ำที่อยู่ในโครงสร้างผลึก (Chemical water) เป็นน้ำที่อยู่ในโครงสร้างทางเคมี ต้องใช้พลังงานมากเพื่อกำจัดน้ำนี้ออกจากโครงสร้างผลึก

2) น้ำที่ใช้เพื่อการขึ้นรูป (Mechanical water) เป็นน้ำที่ทำให้เกิดความเหนียวเพื่อให้สามารถขึ้นรูปได้

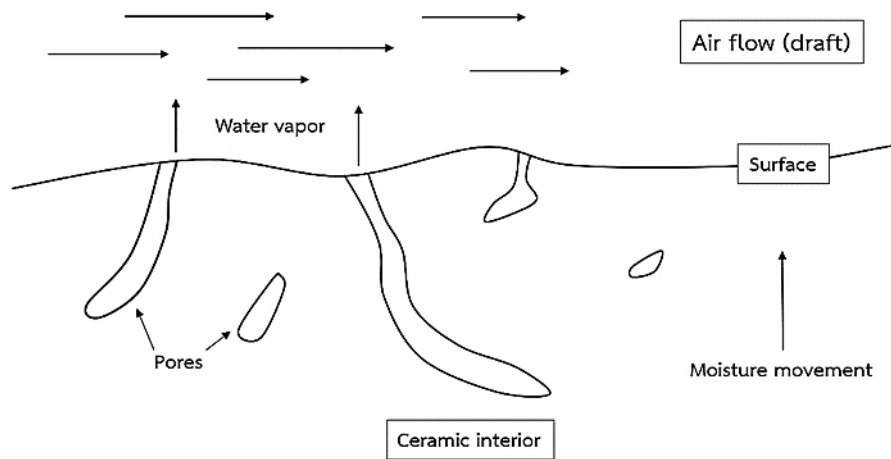
3) น้ำที่อยู่ในบรรยากาศ (Hygroscopic water) เป็นน้ำที่อยู่รอบชิ้นงาน โดยอยู่ในสภาพแวดล้อมที่ส่งผลต่อความชื้นในชิ้นงานและการอบแห้ง

2.6.2 ขั้นตอนการอบแห้ง มีกลไกการเคลื่อนตัวของน้ำภายในเนื้อดินปั้นหลังขึ้นรูปเป็นชิ้นงานจะเคลื่อนที่ขึ้นมาตามรูพรุน เมื่อน้ำที่ผิวชิ้นงานของเนื้อดินปั้นระเหยไป น้ำภายในชิ้นงานจะเคลื่อนที่ขึ้นมาแทนที่ เมื่อเริ่มแรกรูพรุนภายในชิ้นงานมีน้ำอยู่เต็มจะถูกระงกกระทำด้วย 2 แรง ได้แก่

1) แรงไฮโดรสแตติก (Hydrostatic force) เป็นแรงดันน้ำภายในรูพรุนให้ออกมาที่ผิวชิ้นงานจนถึงจุดที่สมดุล

2) แรงจากความต่างศักย์ของความดันไอ (Vapor pressure potential force) เป็นแรงจากความต่างศักย์ของความดันไอในรูพรุน ซึ่งต่อเนื่อกันแบบหลอดเล็ก

แสดงในภาพที่ 2.13 อัตราการระเหยของน้ำที่ผิวของชิ้นงานมีค่าประมาณครึ่งหนึ่งของอัตราการระเหยของน้ำจากผิวน้ำ



ภาพที่ 2.13 กระบวนการระเหยของน้ำหรือความชื้นภายในชิ้นงาน^[16]

2.6.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการอบแห้ง ได้แก่ อุณหภูมิ ความดันไอ และความเร็วลม โดยอัตราการทำให้ชิ้นงานแห้ง คือ การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของความชื้นในชิ้นงานต่อหน่วยเวลา ดังสมการที่ 2.1

$$R = \frac{1}{A} = \frac{dM}{dt} \quad (2.1)$$

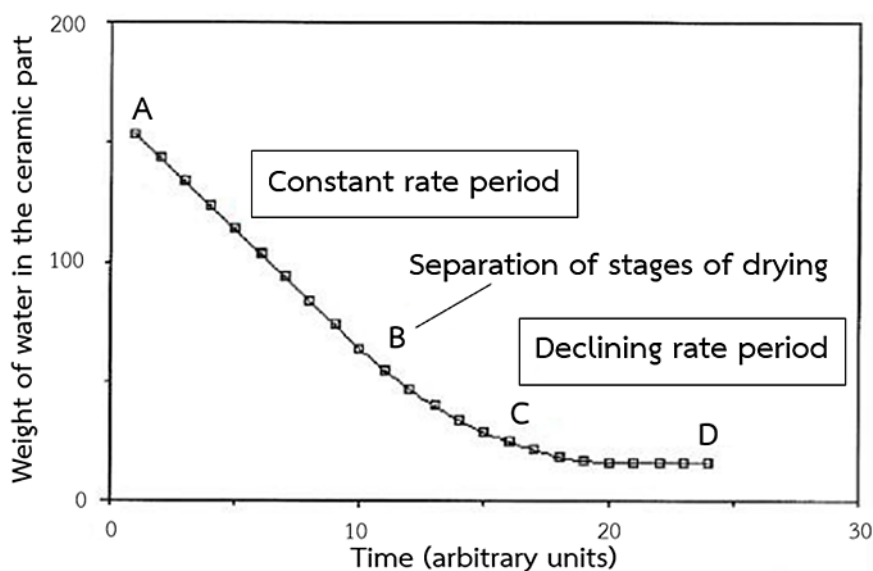
M คือ น้ำหนักของน้ำหรือความชื้นในชิ้นงานเซรามิก หน่วยเป็นกรัม

A คือ พื้นที่ผิวของเซรามิกที่สัมผัสกับสภาพแวดล้อมของการอบแห้ง หน่วยเป็นตารางมิลลิเมตร

t คือ เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง หน่วยเป็นชั่วโมง

จากภาพที่ 2.14 แสดงกราฟของน้ำหนักความชื้นในชิ้นงานต่อเวลา ซึ่งอัตราการอบแห้ง คือ ความชันของเส้นกราฟ สามารถอธิบายได้ดังนี้

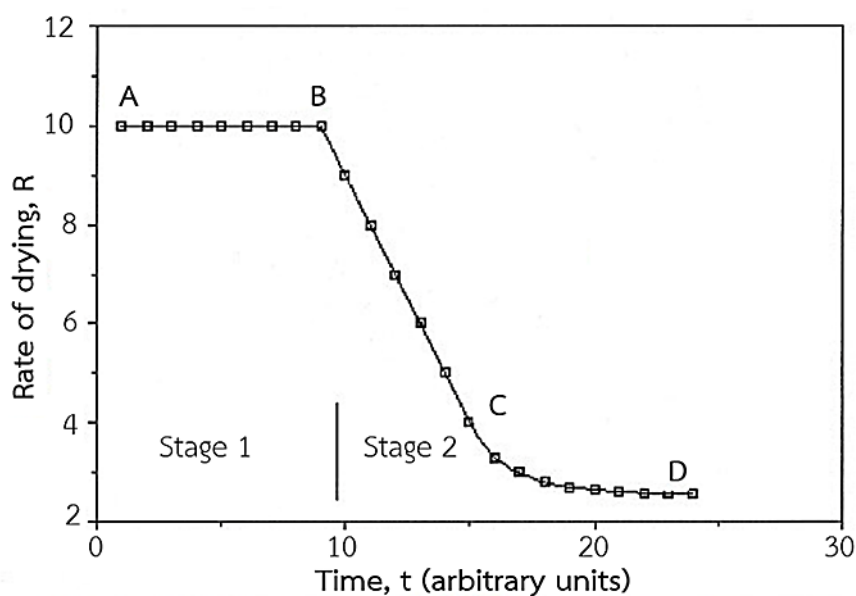
- 1) จากจุด A ถึงจุด B ในช่วงแรกของการอบแห้ง พบว่าอัตราการอบแห้งที่
- 2) จากจุด B ถึงจุด C พบว่าอัตราการอบแห้งจะลดลงด้วยอัตราการอบแห้งที่ เรียกว่า ช่วงอัตราการลดลงช่วงที่ 1
- 3) จากจุด C ถึงจุด D ของการอบแห้ง พบว่าอัตราการอบแห้งจะสมบูรณ์ เรียกว่า ช่วงอัตราการลดลงช่วงที่ 2



ภาพที่ 2.14 การเปลี่ยนแปลงความชื้นภายในชิ้นงานระหว่างการอบแห้ง^[16]

เมื่อนำข้อมูลจากกราฟในภาพที่ 2.14 มาสร้างกราฟระหว่างอัตราการอบแห้งต่อเวลา ดังแสดงในภาพที่ 2.15 สังเกตได้ว่า ในกระบวนการอบแห้งสามารถแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนสำคัญ ได้แก่ ขั้นตอนที่ 1 และ 2 โดยปริมาณความชื้นที่จุด B เรียกว่า ปริมาณความชื้นวิกฤต (Critical moisture, M_c) เพราะทำให้เกิดการหดตัวของรูพรุนเมื่อการอบแห้งเข้าใกล้จุดปริมาณความชื้นวิกฤต แต่การหดตัวของรูพรุนที่จุดต่ำกว่าปริมาณความชื้นวิกฤตนั้นไม่ค่อยมีความสำคัญมากนัก เมื่ออบชิ้นงานที่จุดปริมาณความชื้นวิกฤต ชิ้นงานจะมีความแข็งแรงเหมือนกับหนังแข็ง (Leather-hard) ในกระบวนการผลิตเซรามิกแบบดั้งเดิม อย่างเช่น อิฐ กระเบื้อง เป็นต้น ในกระบวนการอบแห้งในช่วงความแข็งแรงนี้ จะสามารถเคลื่อนย้ายชิ้นงานได้โดยชิ้นงานไม่เกิดการบิดเบี้ยวหรือเกิดความเสียหายของชิ้นงานได้น้อยมาก สรุปได้ว่ากระบวนการอบแห้งที่สำคัญในการอบแห้งชิ้นงานหลังขึ้นรูป แบ่งได้เป็น 2 ขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอนที่ 1 ช่วงที่อัตราการอบแห้งที่ ซึ่งเป็นช่วงที่ชิ้นงานเกิดการหดตัว และการหดตัวลดลงเมื่อถึงจุดปริมาณความชื้นวิกฤต และขั้นตอนที่ 2 คือ ช่วงอัตราการลดลงช่วงที่ 1 และ 2 เนื่องจากเกิดการหดตัวในขั้นตอนที่ 1 จึงจำเป็นต้องจำกัดอัตราของกระบวนการอบแห้งเพื่อป้องกันการแตกของชิ้นงาน เมื่อสิ้นสุดขั้นตอนที่ 1 การหดตัวของชิ้นงานจะลดลง และการให้อุณหภูมิที่สูงขึ้นจะเร่งให้เกิดการอบแห้งอย่างสมบูรณ์ ในขั้นตอนที่ 2 ในช่วงที่อัตราการอบแห้งที่ น้ำที่ผิวชิ้นงานก่อนเผาจะระเหยออกจนหมด ซึ่งสภาวะจะคล้ายกับการระเหยที่เกิดขึ้นบนผิวของน้ำ การสูญเสียน้ำที่ระเหยจากผิวหน้าของชิ้นงานทำให้น้ำที่อยู่ในช่องว่างเล็ก ๆ ภายในผ่านรูพรุนแบบร่างแหออกมาที่ผิว เพื่อให้เกิดความสมดุลขึ้นระหว่างน้ำที่บริเวณผิวหน้าและภายในชิ้นงาน เมื่อปริมาณน้ำมากพอจากการสูญเสียน้ำในรูพรุน น้ำหรือความชื้นที่กระจายตัวภายในชิ้นงานที่เอาไปอบแห้งนั้นไม่เท่ากันที่จุดนี้ เช่น บริเวณขอบชิ้นงาน

จะแห้งกว่าบริเวณภายใน จากการที่แต่ละอนุภาคของดินเหนียวที่บริเวณผิวหน้าจะอยู่ใกล้กันมากกว่า บริเวณภายใน เมื่ออนุภาคเหล่านี้เคลื่อนที่เข้ามาใกล้กันมากเป็นสาเหตุทำให้มวลของชิ้นงานก่อนเผา ลดลง เมื่อกระบวนการระเหยแห้งดำเนินต่อไป ระบบรูเล็ก ๆ ของชิ้นงานไม่สามารถนำความชื้นออก จากภายในด้วยอัตราเร็วของการอบแห้งได้เทียบเท่ากับบริเวณผิวหน้า ดังนั้นปริมาณน้ำหรือความชื้นที่ผิว จึงลดลงอย่างคงที่ เมื่อกระบวนการอบแห้งของปริมาณน้ำหรือความชื้นสุดท้ายที่เคลื่อนที่ออกจาก ภายในชิ้นงาน อัตราการอบแห้งจะเริ่มลดลง และดำเนินเข้าสู่สถานะความแข็งแรงคล้ายหนังแข็ง (Leather-hard state) เมื่อระดับการระเหยจากผิวหน้าชิ้นงานเริ่มเคลื่อนไปภายในชิ้นงานอย่างช้า ๆ น้ำจากภายในใกล้ถึงผิวหน้าจะพบสิ่งกีดขวางที่สำคัญ เรียกว่า ความต้านทานการแพร่ผ่าน ซึ่งเป็นตัว ขัดขวางการเคลื่อนที่ของน้ำสู่ผิวหน้าของชิ้นงาน อัตราการอบแห้งที่จุดนี้จะลดลงอย่างคงที่เมื่อ ปริมาณน้ำหรือความชื้นลดลง และเมื่อเข้าสู่ช่วงสุดท้ายของกระบวนการอบแห้งจะเหลือความชื้น ประมาณร้อยละ 2-4 ปริมาณสุดท้ายจะถูกไล่ออกมา ในระหว่างชิ้นงานถูกเผาที่อุณหภูมิสูง ความชื้นภายในจะระเหยและเคลื่อนที่ผ่านรูเล็ก ๆ ที่อยู่ในรูปร่างเหมาะที่ผิวหน้าชิ้นงาน แต่อัตราการ ระเหยยังคงลดลงอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของแรงต้านการแพร่ผ่าน และ High retention force (Polar bonds และ Sorption force) ที่โมเลกุลของน้ำจุดเปลี่ยนที่ 2 (ภาพที่ 2.15 จุด C) เป็นจุดระหว่างช่วงอัตราการลดลงช่วงที่ 1 และช่วงอัตราการลดลงช่วงที่ 2



ภาพที่ 2.15 อัตราการอบแห้งต่อหน่วยเวลา^[16]

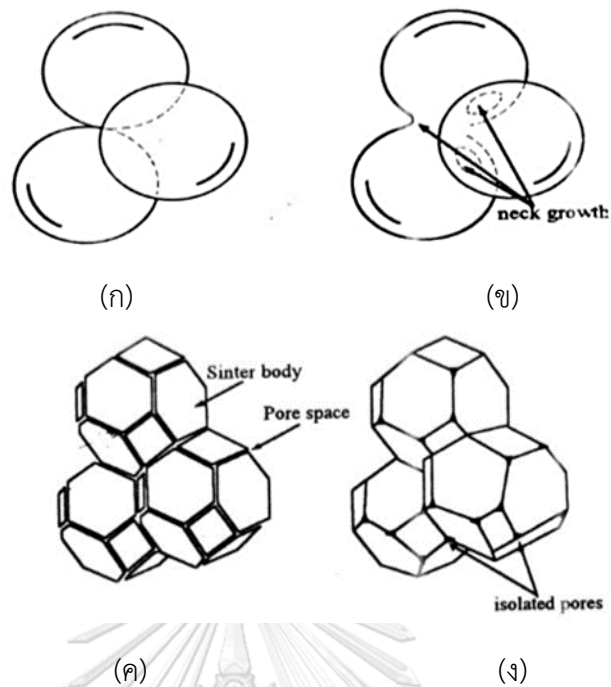
2.7 กระบวนการที่เกิดขึ้นในระหว่างการเผา

กระบวนการที่เกิดขึ้นระหว่างการเผา^[22] เป็นกระบวนการที่สำคัญในการผลิตชิ้นงานทางเซรามิก เนื่องด้วยเป็นขั้นตอนที่ทำให้ชิ้นงานมีความแข็งแรง มีความหนาแน่นสูง หรือได้สมบัติตามผู้ผลิตต้องการ ในการผลิตเซรามิกแบบดั้งเดิม อย่างเช่น อีฐดินเผา จานชาม สุขภัณฑ์ กระเบื้อง เป็นต้น กระบวนการเผาชิ้นงานเรียกว่า การเผาผนึก (Sintering) ที่มีการให้ความร้อนกับตัวชิ้นงาน (Heat treatment) เพื่อเพิ่มความหนาแน่นและความแข็งแรงให้กับชิ้นงาน (Densification) เนื่องด้วยอนุภาคที่อยู่ภายในชิ้นงานเกิดการยึดเหนี่ยวกัน นอกจากนี้ในกระบวนการเผายังเป็นขั้นตอนที่กำหนดสมบัติต่าง ๆ ของอิฐมวลเบาได้ เช่น การดูดซึมน้ำซึ่งมีผลมาจากความพรุนตัว ความหนาแน่นที่ส่งผลต่อความแข็งแรง และการนำความร้อน ดังนั้นกระบวนการหรือปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างการเผาจึงเป็นสิ่งสำคัญเทียบได้กับกระบวนการอื่น ๆ ในการผลิตชิ้นงานทางเซรามิก โดยกลไกที่เกิดขึ้นในกระบวนการเผาและเฟสที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการเผาผนึก สามารถอธิบายได้ดังนี้

2.7.1 กลไกที่เกิดขึ้นในกระบวนการเผา^[11, 22, 23] สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ขั้นตอน ได้แก่

- 1) ขั้นตอนเริ่มต้น (Initial stage) เป็นขั้นตอนแรกของการการเผาผนึก ในขั้นตอนนี้ อนุภาคจะมีการขยับตัวเพื่อให้มีจุดสัมผัสกับอนุภาคที่อยู่รอบข้างให้ได้มากที่สุด จากนั้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะเริ่มเกิดรอยต่อระหว่างอนุภาค ดังแสดงในภาพที่ 2.16 (ก)
- 2) ขั้นตอนกลาง (Intermediate stage) เมื่ออนุภาคมีการเชื่อมต่อระหว่างกัน ในขั้นตอนนี้ ในขั้นตอนนี้พบว่ามีรอยต่อระหว่างอนุภาคที่เชื่อมกันจะโตขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 2.16 (ข) ส่งผลให้ชิ้นงานมีการหดตัว และช่องว่างหรือรูพรุนที่เชื่อมต่อกันระหว่างอนุภาคลดลงตามมา โดยขั้นตอนนี้ อนุภาคจะเริ่มเคลื่อนที่เข้าหากันเพื่อยึดเหนี่ยวกัน
- 3) ขั้นตอนสุดท้าย (Final stage) เป็นขั้นตอนสุดท้ายที่ช่องว่างหรือรูพรุนเริ่มเคลื่อนตัวออกจากชิ้นงาน โดยขนาดของเกรนจะโตขึ้น เนื่องจากเกรนที่มีขนาดเล็กถูกเกรนที่มีขนาดใหญ่กว่ากลืนให้เข้าเป็นเกรนเดียวกัน ขั้นตอนนี้จะเริ่มตันจากรูพรุนเริ่มเคลื่อนที่ออกไปจากชิ้นงาน ดังแสดงในภาพที่ 2.16 (ค) และ (ง)

2.7.2 เฟสที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการเผาผนึก ในระหว่างการเผาผนึกจะพบการเกิดเฟสเกิดขึ้นซึ่งส่งผลให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงมากขึ้น โดยลักษณะของเฟสที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการเผาผนึก มี 2 เฟส^[23] ได้แก่



ภาพที่ 2.16 กลไกที่เกิดขึ้นในกระบวนการเผาผนึก ประกอบด้วย (ก) ขั้นตอนเริ่มต้น (ข) ขั้นตอนกลาง และ (ค) กับ (ง) ขั้นตอนสุดท้าย^[22]

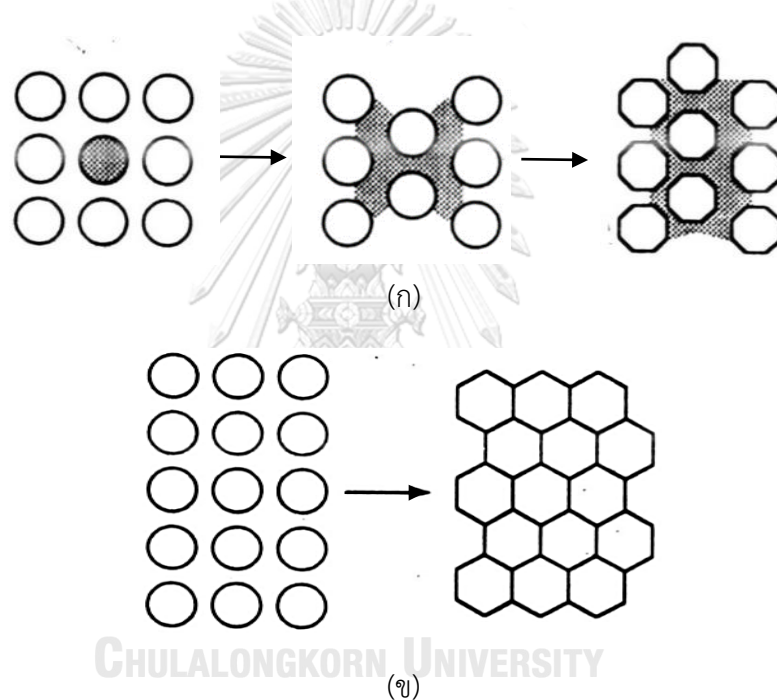
1) การเผาผนึกแบบมีเฟสของเหลว (Liquid phase sintering) เป็นลักษณะของการเผาที่มีเนื้อสารบางส่วนหรือทั้งหมดอยู่ในสภาพของเหลว ข้อดีของเฟสของเหลวคือการให้อนุภาคของชิ้นงานที่เผาเกิดการเชื่อมต่อกันได้ง่าย เนื่องจากอนุภาคเคลื่อนที่เพื่อเชื่อมต่อกันเกิดได้ง่ายขึ้น ดังนั้นชิ้นงานที่มีการเกิดเฟสของเหลวมากในระหว่างการเผา จึงทำให้กระบวนการเผาผนึกเกิดได้ง่ายขึ้น แต่ข้อเสียของเฟสของเหลวที่เกิดขึ้นถ้ามีมากเกินไป ชิ้นงานจะหดตัวสูง สำหรับขั้นตอนการเกิดเฟสของเหลวขณะเผานั้นมี 3 ขั้นตอนดังภาพที่ 2.17 (ก) ได้แก่

1.1) การเกิดเฟสของเหลว (Liquid formation) ในขั้นตอนนี้ อนุภาคบางส่วนที่ปกติเป็นของแข็งจะเริ่มก่อตัวเป็นของเหลว โดยทั่วไปจะเป็นอนุภาคของธาตุที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ ได้แก่ กลุ่มธาตุโลหะอัลคาไล

1.2) การเรียงตัวกันของอนุภาค (Particle rearrangement) สำหรับในขั้นตอนนี้ เฟสของเหลวที่เกิดขึ้นในขั้นตอนแรกจะช่วยทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่นทำให้อนุภาคเคลื่อนที่จัดเรียงตัวใหม่ได้อย่างรวดเร็วขึ้น

1.3) การตกผลึกของสารละลาย (Solution reprecipitation) เป็นขั้นตอนสุดท้ายที่เฟสของเหลวที่ทำหน้าที่ให้อนุภาคเชื่อมต่อกันได้ง่ายขึ้นจะตกผลึกจนกระทั่งกลายเป็นของแข็ง

2) การเผาผนึกแบบมีเฟสของแข็งเท่านั้น (Solid state sintering) ลักษณะของการเกิดเฟสของแข็งระหว่างการเผา นั้น อนุภาคทั้งหมดที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็นเฟสของแข็งบางส่วนหรือทั้งหมด โดยกระบวนการที่ทำให้เกิดการเชื่อมต่อกันระหว่างอนุภาคจะเกิดจากการแพร่ เนื่องจากความแตกต่างระหว่างพลังงานบนผิวของอนุภาค โดยจะมีการแพร่ในลักษณะหลายบริเวณ เช่น การแพร่ที่บริเวณพื้นผิว ที่บริเวณขอบเกรน หรือการแพร่ของแลตทิซ เป็นต้น การเกิดเฟสของแข็งขณะเผา แสดงดังภาพที่ 2.17 (ข)

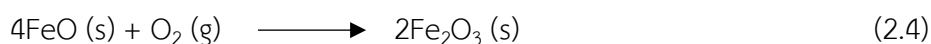
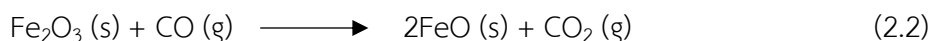


ภาพที่ 2.17 ลักษณะการเผาผนึก ประกอบด้วย (ก) การเผาผนึกแบบมีเฟสของเหลว และ (ข) การเผาผนึกแบบมีเฟสของแข็งเท่านั้น^[23]

2.8 สีที่เกิดหลังการเผา

สีที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์ประเภทอิฐดินเผาส่วนใหญ่เกิดจากปฏิกิริยาของเหล็กออกไซด์ที่มาจากดิน โดยในดินทั่วไปมีองค์ประกอบของเหล็กออกไซด์ประมาณร้อยละ 1-8 สำหรับเฟอร์ริกออกไซด์หรือฮีมาไทต์ (Fe_2O_3) เป็นองค์ประกอบที่มีสีแดงซึ่งส่งผลให้มีเฉดสีแดงในผลิตภัณฑ์ แต่เมื่อถูกรีดิวซ์ด้วยคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) จะเปลี่ยนรูปเป็นแมกนีไทต์ (Fe_3O_4) หรือเฟอร์รัสออกไซด์

(FeO) ซึ่งทำให้ผลิตภัณฑ์มีสีดำทุกอุณหภูมิการเผา โดยคาร์บอนมอนอกไซด์จะเกิดจากการมีปริมาณของแก๊สออกซิเจนไม่เพียงพอในการเผาไหม้เชื้อเพลิง แสดงด้วยปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction) ดังสมการที่ 2.2



จากปฏิกิริยาในสมการที่ 2.3 และ 2.4 เมื่อปริมาณของแก๊สออกซิเจนที่เพียงพอจะช่วยให้ไม่เกิดการถูกรีดิวซ์ยังคงสภาพเป็นเฟอร์ริกออกไซด์หรือฮีมาไทต์ หรือในระหว่างการเผายังดำเนินด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) ซึ่งทำให้ผลิตภัณฑ์ยังคงมีเฉดสีแดง เฉดของสีแดงที่ได้จากเฟอร์ริกออกไซด์นั้นจะขึ้นกับอุณหภูมิที่ใช้ทำการเผา โดยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นการเกิดจุดบกพร่องแบบจุดต่อปริมาตรจะเพิ่มขึ้นตาม โดยความบกพร่องประเภทนี้สามารถเกิดการย้อนกลับได้ แต่อัตราการสลายตัวของจุดบกพร่องในอากาศจะช้ากว่าการเกิดจุดบกพร่องในขณะที่ทำให้ความร้อน เฟอร์ริกออกไซด์จะให้เฉดสีส้มที่อุณหภูมิการเผาไม่สูง แต่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะเปลี่ยนเป็นสีแดงเข้ม และที่อุณหภูมิมากกว่า 1316 องศาเซลเซียส จะกลายเป็นสีดำซึ่งเป็นปฏิกิริยารีดักชันของเหล็กออกไซด์ ในกลุ่มผู้ผลิตอิฐดินเผาหรืออิฐมอญเกือบทั้งหมดจะต้องเผาให้อิฐมีสีส้มถึงส้มเข้ม ด้วยเหตุผลที่ว่าอิฐสีเข้มจะให้ความรู้สึกหรือการรับรู้ได้ถึงความแข็งแรงของตัววัสดุ จึงเป็นที่นิยมของลูกค้าหรือผู้รับเหมาก่อสร้างในการเลือกผลิตภัณฑ์ที่มีเฉดสีที่เข้ม ยกเว้นในกรณีที่ลูกค้าหรือผู้รับเหมาก่อสร้างมีความต้องการให้ผลิตภัณฑ์มีเฉดสีแตกต่างกันออกไป ซึ่งมักจะใช้ในงานประเภทอิฐประดับ^[15, 16, 24]

2.9 สมบัติของอิฐดินเผา

สมบัติของอิฐดินเผาที่สำคัญที่มีผลต่อการใช้งาน^[1, 8, 19, 25] ได้แก่

2.9.1 การหดตัว เมื่อชิ้นงานได้รับความร้อน จะมีการลดขนาดเพื่อให้เกิดความแข็งแรงมากขึ้น ทั้งนี้การหดตัวมีทั้งการหดตัวหลังอบแห้งเนื่องจากการสูญเสียน้ำจากการระเหย และการหดตัวหลังเผาเนื่องจากการหดตัวเพื่อเพิ่มความหนาแน่น โดยการหดตัวมีความสำคัญเนื่องจากอิฐที่หดตัวมากอาจทำให้เกิดการแตกหักเสียหายได้

2.9.2 การดูดซึมน้ำ เป็นสมบัติที่สำคัญของอิฐดินเผาในการป้องกันการดูดซึมน้ำ ทั้งนี้เนื่องจากการใช้งานหลักของอิฐ คือ ใช้เป็นผนังสำหรับป้องกันฝน ดังนั้นอิฐควรมีค่าการดูดซึมน้ำที่ต่ำหรือเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมของอิฐประเภทนั้น ๆ

2.9.3 ความพรุนตัว เป็นสมบัติของอิฐที่เกิดเนื่องจากภายในมีรูพรุนเกิดขึ้น ความพรุนตัวมีผลต่อสมบัติอื่นของชิ้นงาน เช่น ความหนาแน่น ความแข็งแรง การนำความร้อน เป็นต้น

2.9.4 ความหนาแน่น ความหนาแน่นของอิฐดินเผาเป็นสมบัติพื้นฐานที่กำหนดสมบัติอื่น ๆ เช่น ความแข็งแรง การดูดซึมน้ำ การนำความร้อน โดยอิฐทั่วไปที่มีความหนาแน่นสูงและมีการดูดซึมน้ำต่ำ แต่จะมีการนำความร้อนที่สูง ดังนั้นการออกแบบอิฐให้มีความหนาแน่นที่เหมาะสมจึงมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง นอกจากนี้การมีความหนาแน่นที่สูงจะส่งผลให้น้ำหนักของอิฐมากตามไปด้วย

2.9.5 ความต้านทานแรงอัด โดยทั่วไปการใช้งานของอิฐจะต้องใช้รับแรงกดเนื่องจากน้ำหนักของวัสดุก่อสร้างเป็นหลัก ดังนั้นการกำหนดความแข็งแรงของอิฐมักจะกำหนดในรูปของค่าความต้านทานแรงอัด โดยอิฐที่ดีจะต้องมีค่าการต้านทานแรงอัดที่สูงซึ่งบ่งบอกได้ว่าอิฐนั้นมีความแข็งแรงสูง

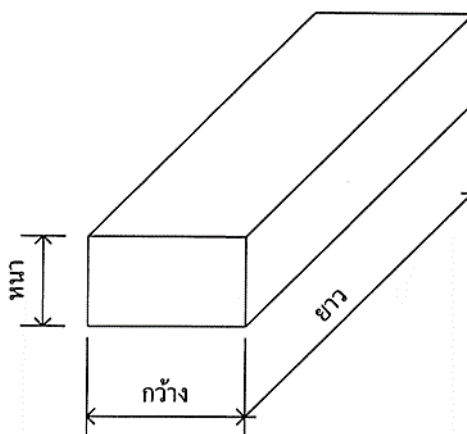
2.9.6 การนำความร้อน คือ ค่าความสามารถในการส่งผ่านความร้อนของวัสดุ ทั้งนี้อิฐดินเผาที่ดีจะต้องมีค่าการนำความร้อนที่ต่ำ เพื่อป้องกันการถ่ายเทความร้อนจากภายนอกอาคารเข้าสู่ตัวอาคาร

2.10 มาตรฐานอุตสาหกรรมของอิฐดินเผา

อิฐดินเผามีการกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม โดยยกตัวอย่างมาตรฐานอุตสาหกรรมอิฐก่อสร้างสามัญ มอก.77-2545^[8] ที่มีการจำแนกผลิตภัณฑ์อิฐดินเผาตามชั้นคุณภาพและขนาด แสดงในตารางที่ 2.1 และภาพที่ 2.18 มีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ 2.1 การจำแนกผลิตภัณฑ์อิฐดินเผาตามชั้นคุณภาพและขนาด^[8]

ชั้นคุณภาพ	ขนาด (ยาว x กว้าง x หนา) มิลลิเมตร
ก ข และ ค	140 x 65 x 40
	190 x 90 x 40
	190 x 90 x 65
	190 x 90 x 90



ภาพที่ 2.18 ขนาดของอิฐก่อสร้างสามัญ^[8]

ในส่วนของความต้านทานแรงอัดและการดูดซึมน้ำมีการกำหนดเกณฑ์ ตามตารางที่ 2.2 มีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ 2.2 ความต้านทานแรงอัดและการดูดซึมน้ำของผลิตภัณฑ์อิฐดินเผาตามชั้นคุณภาพ^[8]

ชั้นคุณภาพ	ความต้านทานแรงอัดต่ำสุด (เมกะพาสคัล)		การดูดซึมน้ำสูงสุด (ร้อยละ)	
	เฉลี่ย 5 ก้อน	แต่ละก้อน	เฉลี่ย 5 ก้อน	แต่ละก้อน
ก	21.0	17.0	17.0	20.0
ข	17.0	15.0	22.0	25.0
ค	10.0	9.0	ไม่กำหนด	ไม่กำหนด

2.11 คอนกรีตมวลเบา

คอนกรีตมวลเบา (Lightweight concrete) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า คอนกรีต-บล็อกมวลเบา เป็นวัสดุก่อสร้างที่พัฒนาขึ้นมาใหม่ โดยลักษณะการใช้งานจะเหมือนกับอิฐดินเผา ใช้สำหรับงานก่อสร้างผนัง ด้วยคุณสมบัติพิเศษที่มีความหนาแน่นต่ำและมีการนำความร้อนที่ต่ำ ทนความร้อนที่อุณหภูมิสูงและมีความต้านทานแรงอัดสูงกว่าอิฐมอญและคอนกรีตบล็อกทั่วไป 2-4 เท่า การจำแนกประเภทและมาตรฐานอุตสาหกรรมของคอนกรีตมวลเบา^[26, 27] อธิบายได้ดังนี้

2.11.1 ประเภทของคอนกรีตมวลเบา คอนกรีตมวลเบา มีหลายประเภท แบ่งตามวัตถุประสงค์ที่ใช้และกระบวนการผลิตที่ต่างกัน ได้แก่

- 1) แบ่งตามชนิดของคอนกรีตมวลเบา โดยทั่วไปสามารถแบ่งออกเป็น 3 ชนิดหลัก ดังนี้

1.1) คอนกรีตมวลเบาชนิดทำฉนวน (Insulating lightweight concrete) มีความหนาแน่นตั้งแต่ 315-1,100 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

1.2) คอนกรีตมวลเบาชนิดใช้เป็นโครงสร้าง (Structural lightweight concrete) มีความหนาแน่นตั้งแต่ 1,400-1,800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

1.3) คอนกรีตมวลเบาชนิดกึ่งเบา (Semi-lightweight concrete) มีความหนาแน่น 1,800-2,050 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

2) แบ่งตามกระบวนการผลิต แบ่งตามกระบวนการผลิตที่ต่างกันจะทำให้สมบัติของคอนกรีตมวลเบาแตกต่างกันด้วย สามารถแบ่งได้เป็น 2 กระบวนการ ได้แก่

2.1) การผลิตแบบไม่ผ่านการอบไอน้ำภายใต้ความดันสูง (Non-autoclaved system) การผลิตวิธีนี้เป็นการนำวัตถุดิบที่เตรียมไว้มาพร้อมด้วยตะแกรงคัดขนาดเพื่อแยกส่วนหยาบออก นำวัตถุดิบแต่ละชนิดที่เตรียมไว้จะถูกเทลงคลุกเคล้าในเครื่องผสม จากนั้นเติมน้ำลงไปคลุกเคล้าเป็นลำดับสุดท้าย กระทั่งส่วนผสมรวมกันเป็นเนื้อเดียว นำไปอัดเป็นรูปตามขนาดที่ต้องการ หลังจากถอดแบบพิมพ์จะตากลมทิ้งไว้ประมาณ 2-3 วัน คอนกรีตมวลเบาแบ่งตามกระบวนการผลิตได้เป็น 2 ประเภท^[26, 28] ดังนี้

2.1.1) ประเภทที่ 1 ใช้วัสดุเบากว่ามาทดแทน (Aggregate lightweight concrete) เช่น เศษไม้ เม็ดโฟม เป็นต้น ดังภาพที่ 2.19 ทำให้คอนกรีตมีความหนาแน่นน้อยลง แต่จะมีอายุการใช้งานสั้น หรือเม็ดโฟมนั้นอาจเป็นอันตรายได้ซึ่งเป็นพิษต่อผู้อยู่อาศัยหากเกิดอัคคีภัย



ภาพที่ 2.19 อิฐมวลเบาที่มีการเติมเม็ดโฟมแล้วเผาไล่ออก

2.1.2) ประเภทที่ 2 ใช้สารเคมี (Cellular lightweight concrete) ยกตัวอย่างเช่น การเติมฟองโฟม เพื่อทำให้เนื้อคอนกรีตฟูและทิ้งให้แข็งตัว โดยรูพรุนจากฟองโฟมจะถูกกักไว้ในชั้นอิฐบล็อกมวลเบา ดังภาพที่ 2.20 ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์อิฐบล็อกมวล

เบาแบบกักฟองอากาศ แต่คอนกรีตประเภทนี้จะมีการหดตัวมากกว่า ทำให้ปูนฉาบแตกร้าวได้ง่าย รับกำลังแรงอัดได้น้อย

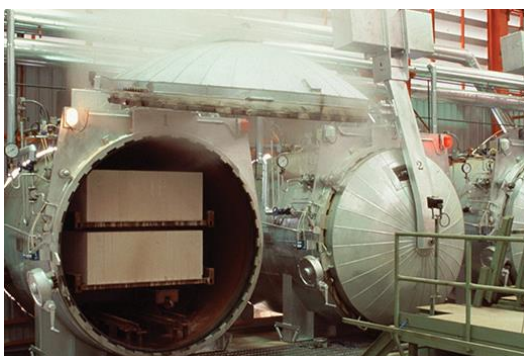


ภาพที่ 2.20 อีฐบล็อกจากมวลเบาแบบกักฟองอากาศ^[14]

2.2) การผลิตแบบผ่านการอบไอน้ำภายใต้ความดันสูง (Autoclaved system) ดังแสดงในภาพที่ 2.21 การผลิตวิธีนี้เป็น การนำวัตถุดิบหลัก ได้แก่ ทราย มาบดด้วยเครื่องบด แล้วนำไปผสมกับน้ำ ในขณะที่เดียวกันจะนำวัตถุดิบอื่นที่ใช้ในการผลิต ได้แก่ ปูนขาว ผงอะลูมิเนียม ทราย ซีเมนต์ และยิปซัม ผสมเข้ากันตามอัตราส่วนด้วยเครื่องผสม ในลำดับแรกจะนำทรายบดและยิปซัมมาผสมกัน ประกอบกับปูนขาวจะผสมกับซีเมนต์ จากนั้นจึงนำมาผสมกันทั้งหมด และในขั้นตอนสุดท้ายของการผสมจะเติมผงอะลูมิเนียม เทในแบบพิมพ์แล้วนำเข้าไปบ่มเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเป็นฟองอากาศและฟูขึ้นมา นำเข้าเครื่องตัดและเครื่องทำโครงตาข่าย นำผ่านเข้าเครื่องอบโดยสายพานลำเลียง ซึ่งสามารถแบ่งตามวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตแบ่งได้เป็น 2 ประเภท^[29] ดังนี้

2.2.1) ประเภทที่ 1 การใช้ปูนขาว ซึ่งควบคุมคุณภาพได้ยาก การใช้ปูนขาวเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตนั้น มักจะทำให้คุณภาพคอนกรีตที่ได้ไม่ค่อยสม่ำเสมอ

2.2.2) ประเภทที่ 2 การใช้ปูนซีเมนต์ ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 คอนกรีตที่ได้มักจะมีคุณภาพที่สม่ำเสมอเมื่อเปรียบเทียบกับ การใช้ปูนขาว



ภาพที่ 2.21 อิฐบล็อกมวลเบาแบบผ่านการอบไอน้ำภายใต้ความดันสูง^[29]

2.11.2 มาตรฐานอุตสาหกรรมอิฐบล็อกมวลเบา โดยยกตัวอย่างเป็นมาตรฐานคอนกรีต บล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ มอก.2601-2556^[3] โดยมีการแบ่งชนิดและสมบัติ ในตารางที่ 2.3 และขนาดของอิฐบล็อกมวลเบาที่กำหนดขนาดตามมาตรฐานอุตสาหกรรม ในตารางที่ 2.4 มีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ 2.3 ชนิดและสมบัติของอิฐบล็อกมวลเบา^{[3][3][3][3][3][3][3][3]}

ชนิด	ความหนาแน่นเชิงปริมาตร ในสภาพแห้งเฉลี่ย (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	ความต้านทานแรงอัด ต่ำสุด (เมกะพาสคัล)	การดูดซึมน้ำสูงสุด (ร้อยละ)
C6	501 ถึง 600	2.0	25
C7	601 ถึง 700		
C8	701 ถึง 800		
C9	801 ถึง 900	2.5	23
C10	901 ถึง 1000		
C12	1001 ถึง 1200		
C14	1201 ถึง 1400	5.0	20
C16	1401 ถึง 1600		

ตารางที่ 2.4 ขนาดของอิฐบล็อกมวลเบาที่กำหนดขนาดตามมาตรฐานอุตสาหกรรม

ความยาว (มิลลิเมตร)	ความสูง (มิลลิเมตร)	ความหนา (มิลลิเมตร)
200	300	เป็นไปตามที่ฉลากกำหนด
	400	
	500	
	600	

2.12 อิฐดินเผามวลเบา

การพัฒนาอิฐดินเผาแบบดั้งเดิมให้มีน้ำหนักหรือความหนาแน่นลดลง โดยการเพิ่มความพรุนตัวให้กับอิฐดินเผา โดยเรียกว่า อิฐดินเผามวลเบา สำหรับแนวทางในการพัฒนาผลิตภัณฑ์

อิฐดินเผาให้เป็นอิฐดินเผามวลเบา ทำได้โดยการเติมสารหรือวัตถุดิบที่ทำให้เกิดความพรุนตัวในเนื้ออิฐดินเผา^[30] ได้แก่

2.12.1 การใช้สารอินทรีย์หรือวัตถุดิบที่เหลือใช้ทางการเกษตรหรือชีวมวล (Biomass) หรือกากตะกอนจากโรงงานอุตสาหกรรม (Industrial sludge) มาเติมหรือทดแทนบางส่วนของวัตถุดิบหลักที่ใช้ในการผลิต จุดเด่นของวิธีนี้ คือ กากตะกอนหรือสิ่งที่เหลือจากการผลิตในอุตสาหกรรมเกษตรมีปริมาณที่มาก การนำของเสียที่ต้องการกำจัดทิ้งมาใช้ให้เกิดประโยชน์ ซึ่งเป็นการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมไปอีกด้วย หลักการของการทำให้เกิดความพรุนตัวจะเกิดขึ้นเมื่อมีการเผาขึ้นงานอิฐดินเผาทำให้อินทรีย์สารที่เป็นส่วนประกอบหลักของวัตถุดิบกลุ่มนี้เกิดการสลายตัวออกไป ส่งผลให้เกิดรูพรุนเป็นจำนวนมากในเนื้อดินเผา ตัวอย่างของวัตถุดิบที่ใช้ เช่น แกลบ เถ้าแกลบ กากชานอ้อย เป็นต้น^[1, 31-33]

2.12.2 การใช้สารอินทรีย์ที่ทำให้เกิดความพรุนตัว เนื่องจากเกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ระหว่างกระบวนการเผาจากการทำปฏิกิริยาของแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO₃) ที่เติมเป็นวัตถุดิบหลัก ซึ่งจะส่งผลให้เกิดความพรุนตัวในเนื้อดินเผา เช่น ผงหินจากหินอ่อน^[34] เป็นต้น

จุดเด่นของอิฐดินเผามวลเบาขึ้นคือการมีสมบัติอยู่กึ่งกลางระหว่างผลิตภัณฑ์อิฐดินเผา กับอิฐบล็อกมวลเบาที่มีการผลิตกันจริงในประเทศไทย ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมของอิฐดินเผา และอิฐบล็อกมวลเบากำหนด โดยเมื่อเปรียบเทียบสมบัติของอิฐทั้ง 3 ชนิด แสดงดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 การเปรียบเทียบสมบัติของอิฐดินเผา อิฐบล็อกมวลเบาและอิฐดินเผามวลเบา^[15, 30]

สมบัติ	ชนิดของอิฐ		
	อิฐดินเผา	อิฐบล็อกมวลเบา	อิฐดินเผามวลเบา
ความหนาแน่น (กรัม/ลบ.ซม.)	สูงกว่า 1.5	ต่ำกว่า 1.2	1.0-1.5
ความต้านทานแรงอัด (เมกะพาสคัล)	9.0-21.0	2.0-5.0	2.0-9.0
การดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)	ไม่เกิน 20.0	ไม่เกิน 25.0	20.0-30.0
สัมประสิทธิ์การนำความร้อน	สูง	ต่ำ	ปานกลาง

2.13 ถ่านหินเหมืองแม่เมาะ

ถ่านหิน เป็นเชื้อเพลิงธรรมชาติซึ่งมีสถานะเป็นของแข็ง เกิดจากการทับถมกันของซากพืชซากสัตว์ และซากสิ่งมีชีวิตต่าง ๆ ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อหลายสิบล้านปี หลังจากนั้นยังมีตะกอนดินทรายมาทับถมซ้ำลงไปอีก และมีการเปลี่ยนแปลงของผิวพื้นโลกจากน้ำหนักรวมทั้งความร้อนจาก

ภายในโลก ทำให้ซากสิ่งมีชีวิตที่ทับถมกันนี้แปรสภาพเป็นพีท (Peat) ซึ่งเป็นลำดับเริ่มต้นของกระบวนการเกิดถ่านหิน พีทมีลักษณะเป็นเนื้อไม้ มีความพรุนตัวสูง ทำให้ดูดซับน้ำได้ดี และมีสีน้ำตาลอ่อนไปจนถึงสีดำ เมื่อเวลาผ่านไปอีกหลายสิบล้านปี พีทจะมีการแปรสภาพเป็นถ่านหินมีลักษณะเป็นถ่านหินสีน้ำตาลอ่อนจนถึงสีน้ำตาลเข้ม แหล่งถ่านหินส่วนมากในประเทศไทยปรากฏพบในภาคเหนือและภาคใต้ แต่จะพบในบริเวณทางภาคเหนือเป็นส่วนใหญ่ ในทางธรณีวิทยาได้จัดแบ่งถ่านหินออกเป็น 4 ประเภท ได้แก่ ลิกไนต์ (Lignite) บิทูมินัส (Bituminous) ซับบิทูมินัส (Subbituminous) และแอนทราไซต์ (Anthracite) โดยแบ่งตามสมบัติต่าง ๆ ได้แก่ ค่าความร้อน ค่าความชื้น ปริมาณเถ้าถ่าน และปริมาณคาร์บอน^[35] ดังแสดงในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 สมบัติของถ่านหินแอนทราไซต์ บิทูมินัส ซับบิทูมินัสและลิกไนต์^[35]

ชนิดถ่านหิน	ค่าความร้อน	ค่าความชื้น	ปริมาณเถ้าถ่าน	ปริมาณคาร์บอน
แอนทราไซต์	สูง	ต่ำ	ต่ำ	ต่ำ
บิทูมินัส	สูง	ต่ำ	ต่ำ	ต่ำ
ซับบิทูมินัส	ปานกลาง-สูง	ปานกลาง	ปานกลาง	ปานกลาง
ลิกไนต์	ต่ำ-ปานกลาง	สูง	สูง	ต่ำ-สูง

เหมืองแม่เมาะได้เริ่มผลิตถ่านหินตั้งแต่ปี พ.ศ. 2498 โดยการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยที่ตำบลบ้านเมาะ อำเภอมะเมาะ จังหวัดลำปาง สามารถผลิตถ่านให้โรงจักรไฟฟ้าตั้งแต่ปี พ.ศ. 2498 จนถึงสิ้นปี พ.ศ. 2527 รวมประมาณ 10.37 ล้านตัน และยังทำงานต่อจนถึงปัจจุบัน ถ่านหินในแอ่งแม่เมาะจัดอยู่ในชั้นลิกไนต์ และบางส่วนเป็นซับบิทูมินัส แหล่งลิกไนต์ที่พบเกิดในแอ่งรูปกระทะหงายประกอบด้วย

- 1) ด้านทิศเหนือเป็นหินควอร์ตไซต์ (Quartzite)
- 2) ด้านทิศตะวันออกกับทิศตะวันตกเป็นหินปูน
- 3) ด้านทิศใต้เป็นหินบะซอลต์ (Basalt) วางตัวบนหินปูน
- 4) เปลือกดินชั้นบนเป็นดินเหนียวและหินลูกรัง
- 5) ส่วนชั้นถัดลงไปเป็นดินเหนียวแข็ง หินดินดานหรือหินโคลน

ปริมาณถ่านที่สำรวจพบในปี พ.ศ.2555 ประมาณ 1,200 ล้านตัน สามารถใช้ประโยชน์ประมาณ 400 ล้านตัน ในการเดินเครื่องโรงไฟฟ้าหน่วยที่ 1-13 จะใช้ถ่านหินประมาณวันละ 60,000 ตัน โรงไฟฟ้าแม่เมาะ โดยการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยเป็นโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนที่ใช้ถ่านหินลิกไนต์เป็นเชื้อเพลิง โดยมีวิธีการเปลี่ยนพลังงานความร้อนด้วยกระบวนการทางเคมีที่เริ่มต้นจากการเผาไหม้กับออกซิเจนในอากาศ จากนั้นพลังงานความร้อนที่ได้จะถูกส่งต่อไปให้น้ำจนน้ำเดือด

กลายเป็นไอน้ำที่อุณหภูมิและความดันสูง ไอน้ำดังกล่าวจะไปหมุนกังหันไอน้ำ ซึ่งได้ต่อไปแกนหมุนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในขณะเดียวกัน^[35, 36]

2.14 ถ่านหินลิกไนต์

ถ่านหินลิกไนต์ (Lignite coal)^[36, 37] แยกเป็นส่วนสำคัญ 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ลุกไหม้และส่วนที่เป็นถ่านลิกไนต์ ปริมาณความร้อนของเชื้อเพลิงจะได้จากส่วนที่ลุกไหม้ ส่วนที่เป็นถ่านเป็นส่วนที่เหลือจากกระบวนการลุกไหม้ซึ่งท้ายที่สุดต้องระบายออกจากเตาและพื้นเตาในโรงไฟฟ้า ในส่วนของถ่านเป็นส่วนประกอบเป็นสารประกอบออกไซด์ที่ถูกความร้อนสูงในการเผาไหม้มาแล้ว ถ่านลิกไนต์เกิดจากส่วนประกอบสำคัญ 2 ส่วน ได้แก่

- 1) แร่ธาตุ ได้แก่ แร่ธาตุอนินทรีย์ ที่แทรกซึมเข้าไประหว่างการทับถมจนกลายเป็นถ่านหิน
- 2) หินดินดาน ได้แก่ ชั้นดินที่ปิดทับแนวถ่านลิกไนต์ และที่แทรกอยู่ระหว่างชั้นถ่าน เมื่อผ่านกระบวนการบดแล้วอาจคัดออกได้ไม่หมด ส่วนประกอบที่สำคัญที่สุดของหินดินดาน คือ ซิลิกา (SiO_2) ซึ่งเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของถ่านลิกไนต์

ถ่านลิกไนต์ เป็นถ่านที่ได้หลังจากการเผาถ่านหิน เกิดจากการที่อนุภาคของถ่านที่เหลือจากการเผาไหม้ปะทะกันเป็นเม็ดหรือเป็นก้อนโต หรือมีบางส่วนของถ่านที่ปะทะกับผนังเตาและหลอมติดกันเป็นก้อนขนาดใหญ่ เมื่อมีน้ำหนักรวมกันมากขึ้นจะหล่นลงสู่ก้นเตา ซึ่งแตกต่างจากถ่านลิกไนต์ที่จะถูกพัดพาไปตามอากาศร้อน และถูกดักจับโดยให้หลักการไฟฟ้าสถิต (Electrostatic precipitator) แสดงในภาพที่ 2.22 (ก) ถ่านหนัก และ (ข) ถ่านลอย

2.14.1 สมบัติทางกายภาพ อนุภาคของถ่านหนักมีลักษณะที่เป็นพื้นที่ผิวที่มีรูพรุน มีสีดำ โดยมีความถ่วงจำเพาะอยู่ในช่วง 2.1-2.7 มีความหนาแน่นรวมเป็น 1,000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และมีความหนาแน่นสูงสุดเป็น 1,210-1,620 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

2.14.2 องค์ประกอบทางเคมี องค์ประกอบหลักทางเคมีของถ่านหนักประกอบด้วย ซิลิกา (SiO_2) อะลูมินา (Al_2O_3) เฟอริกออกไซด์ (Fe_2O_3) และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ดังแสดงในตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 องค์ประกอบทางเคมีของถ่านหนัก จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง^[37]

องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละโดยน้ำหนัก)									
SiO_2	Al_2O_3	CaO	Fe_2O_3	K_2O	SO_3	MgO	Na_2O	TiO_2	P_2O_5
40.57	21.94	20.26	9.65	2.82	0.19	1.76	0.88	0.48	0.21



(ก)

(ข)

ภาพที่ 2.22 แก้วลิกไนต์ ประกอบด้วย (ก) แก้วหนัก และ (ข) แก้วลอย

2.15 ปูนปลาสเตอร์

ปูนปลาสเตอร์ (Plaster)^[4, 6, 38] มีการใช้กันอย่างแพร่หลายในกลุ่มประเทศยุโรป ปูนปลาสเตอร์ที่รู้จักกันแพร่หลายซึ่งเป็นต้นกำเนิดจากชื่อ ปลาสเตอร์ ออฟ ปารีส (Plaster of Paris) ในประเทศฝรั่งเศส ในประเทศไทยได้มีการใช้ปูนปลาสเตอร์เป็นแบบพิมพ์พระดินเผาในสมัยอยุธยาที่ทำจากดินแล้วนำไปเผาในอุณหภูมิที่ต่ำซึ่งมีสมบัติในการดูดซึมน้ำคล้ายปูนปลาสเตอร์ ในระบบอุตสาหกรรมเครื่องปั้นดินเผาซึ่งตรงกับยุคปฏิวัติอุตสาหกรรม ได้มีการนำปูนปลาสเตอร์มาใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตเครื่องปั้นดินเผา สามารถทำให้ผลิตชิ้นงานได้ครั้งละมาก และขนาดชิ้นงานมีความสม่ำเสมอ ลดจำนวนช่างฝีมือในการปั้นลดลง ปูนปลาสเตอร์ที่จำหน่ายกันอยู่ในปัจจุบันมีให้เลือกหลากหลายชนิด ซึ่งผู้ใช้จำเป็นต้องเลือกใช้ให้เหมาะสมกับงาน เช่น ปูนปลาสเตอร์สำหรับงานทางการแพทย์และทางทันตกรรม ปูนปลาสเตอร์สำหรับงานประติมากรรม หรือปูนปลาสเตอร์สำหรับการผลิตเครื่องปั้นดินเผา เป็นต้น วิธีการผลิตและลักษณะของปูนปลาสเตอร์ สามารถอธิบายได้ดังนี้

2.15.1 วิธีการผลิตปูนปลาสเตอร์ ปูนปลาสเตอร์ผลิตจากแร่ยิปซัม โดยแร่ยิปซัม (Gypsum) คือ แคลเซียมซัลเฟต มีสูตรเคมีประกอบด้วย $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ มีน้ำหนักโมเลกุล 172.18 ซึ่งมีน้ำในโครงสร้างอยู่ 2 โมเลกุล แร่ยิปซัมประกอบด้วยแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ร้อยละ 32.6 ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) ร้อยละ 46.5 และน้ำ (H_2O) ร้อยละ 20.9 เมื่อนำไปผลิตปูนปลาสเตอร์มีสูตรเคมีประกอบด้วย $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ มีน้ำหนักโมเลกุล 154.16 ประกอบด้วย แคลเซียมซัลเฟต ร้อยละ 93.8 และน้ำ ร้อยละ 6.2 ในวิธีการทำปูนปลาสเตอร์จะนำยิปซัมที่มีความบริสุทธิ์มาบดละเอียดแล้วเผาไล่น้ำ (Calcination) ออกจากผลึกแร่ให้เหลือครึ่งโมเลกุล วิธีการผลิต

ปูนปลาสเตอร์ สามารถแบ่งออกเป็น 2 วิธี ซึ่งมีกระบวนการผลิตที่แตกต่างกัน ทำให้คุณสมบัติของปูนปลาสเตอร์แตกต่างกันออกไป ได้แก่

1) ปูนชนิดบีตาปลาสเตอร์ (Beta-plaster) ปูนชนิดบีตาปลาสเตอร์มีกรรมวิธีการผลิตโดยนำแรยิปซัมที่ขุดได้จากแหล่งมาบดย่อยเป็นผงละเอียด แล้วนำมาเผาผ่านความร้อนในกระทะเหล็ก ให้อิฐน้ำระเหยออกไปทางด้านบน โดยกวนด้วยเครื่องจักรความเร็วรอบประมาณ 15 รอบต่อนาที โดยทำเป็นถังโลหะสำหรับกวนผงปูนขณะที่ให้ความร้อนเข้าไปประมาณ 180 องศาเซลเซียส น้ำในผลึกปูนระเหยตัวออกครั้งแรกที่ อุณหภูมิ 128 องศาเซลเซียส เป็นการเดือดครั้งแรก น้ำในผลึกปูนจะเกิดการระเหยตัวออกอีกครั้งที่อุณหภูมิ 163 องศาเซลเซียส เป็นการเดือดครั้งที่สอง การผลิตโดยวิธีนี้ต้องเร่งความร้อนขึ้นอย่างช้า ๆ และต้องกวนอยู่ตลอดเวลาเพื่อให้น้ำระเหยออกไปได้ การผลิตวิธีนี้จะได้ปูนชนิดบีตาปลาสเตอร์ ซึ่งนำมาใช้งานการทำแบบพิมพ์หล่อหรือแบบพิมพ์ในการใช้งานทั่วไป และปูนปลาสเตอร์ชนิดนี้ที่อุณหภูมิ 163 องศาเซลเซียส ใช้งานด้านประติมากรรม

2) ปูนชนิดแอลฟาปลาสเตอร์ (Alpha-plaster) การผลิตปูนปลาสเตอร์ชนิดแอลฟาปลาสเตอร์ ผลิตโดยวิธีอบไอน้ำ จะได้ปูนปลาสเตอร์ที่มีความแข็งแรงสูง เรียกว่า ยิปซัมซีเมนต์ (Gypsum cement) วิธีการผลิตโดยใช้วัตถุดิบที่มีคุณภาพหรือความบริสุทธิ์สูง มาใช้ในการผลิต โดยนำผงแรยิปซัมเผาผ่านความร้อนในหม้ออบความดันที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ซึ่งการเผาครั้งนี้มีการควบคุมความดันของไอน้ำหรือความชื้นในหม้ออบ ในการผลิตปูนปลาสเตอร์ซีเมนต์ทางผู้ผลิตจะผสมสีฝุ่นลงไปเนื้อปูนเพื่อให้เกิดความแตกต่างไปจากปูนปลาสเตอร์ชนิดธรรมดา นอกจากนี้ปูนชนิดแอลฟาปลาสเตอร์ยังสามารถนำไปใช้งานหล่อทองคำและหล่อโลหะ และใช้ในงานด้านทันตแพทยอีกด้วย

2.15.2 ลักษณะของปูนปลาสเตอร์ ลักษณะของปูนปลาสเตอร์จะมีความแตกต่างกันทางด้านวิธีการผลิต^[6] เปรียบเทียบได้ดังตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 ความแตกต่างของปูนปลาสเตอร์แต่ละประเภท^[6]

วัตถุดิบ	สูตรเคมี	กรรมวิธีการผลิต
ยิปซัม	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	ยิปซัมตามธรรมชาติ
แอลฟาปลาสเตอร์	$\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$	อบด้วยแรงดันไอน้ำ
บีตาปลาสเตอร์	$\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$	เผาผ่านความร้อน

จากตารางข้อแตกต่างของกรรมวิธีการผลิตของปูนปลาสเตอร์แต่ละชนิด ซึ่งปูนปลาสเตอร์ที่ได้นั้นจะมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันดังแสดงจากตารางเปรียบเทียบ ซึ่งการเปรียบเทียบสมบัติระหว่างปูนปลาสเตอร์ชนิดธรรมดา กับปูนปลาสเตอร์ซีเมนต์ สามารถแสดงได้ในตารางที่ 2.9 ดังนี้

ตารางที่ 2.9 การเปรียบเทียบสมบัติระหว่างปูนปลาสเตอร์ชนิดธรรมดา กับปูนปลาสเตอร์ซีเมนต์^[6]

สมบัติ	ปูนปลาสเตอร์ธรรมดา (ปีตาปลาสเตอร์)	ปูนปลาสเตอร์ซีเมนต์ (แอลฟาปลาสเตอร์)
ความแข็งแรง	น้อย	มาก
ความละเอียด	ปานกลาง	สูง
ความพรุนตัวและดูดซึมน้ำ	สูง	ต่ำ
การแข็งตัว	เร็ว	ช้า

งานวิจัยเกี่ยวกับการนำแบบพิมพ์ปูนปลาสเตอร์ใช้แล้วนำกลับมาใช้ เช่น การศึกษาโดยใช้แบบพิมพ์ที่หมดอายุผสมกับทราย ซิลิกา และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เพื่อผลิตเป็นอิฐประสานหรือผนังสำเร็จรูป^[4-6, 39] การศึกษาสมบัติการแข็งตัวของปูนปลาสเตอร์ใช้แล้วจากอุตสาหกรรมเซรามิก^[4-6, 39] การศึกษาเพื่อพัฒนาเทคโนโลยีการนำแบบพิมพ์ปูนปลาสเตอร์ใช้แล้วกลับมาใช้ ดังภาพที่ 2.23 โดยการนำแบบพิมพ์ปูนปลาสเตอร์ที่ผ่านการใช้งานแล้วจากอุตสาหกรรมเซรามิกมาคัดแยกประเภทเป็นแบบพิมพ์ที่ใช้สำหรับงานหล่อและงานปั้น เนื่องจากด้วยการขึ้นรูปด้วยดินเหนียวมักไม่มีส่วนผสมของสารเติม ส่วนการขึ้นรูปด้วยน้ำดินมักมีการเติมสารช่วยกระจายตัว เช่น โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) พอลิอิเล็กโทรไลต์ (Polyelectrolyte) อีกทั้งแบบพิมพ์ปูนปลาสเตอร์ที่ใช้ในการขึ้นรูปทั้งสองแตกต่างกัน เมื่อนำมาบดเพื่อให้ได้อนุภาคที่มีขนาดตามกำหนด วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี เปรียบเทียบสมบัติของปูนปลาสเตอร์ใช้แล้วกับปูนปลาสเตอร์ที่ใช้ในปัจจุบัน และทดลองนำปูนปลาสเตอร์ใช้แล้วนำกลับมาใช้ทำเป็นแบบพิมพ์สำหรับงานหล่อ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าแบบพิมพ์ปูนปลาสเตอร์ใช้แล้วเมื่อนำไปบดละเอียดมีศักยภาพในการนำกลับมาใช้ได้อีก^[4-6, 39]



ภาพที่ 2.23 แบบพิมพ์ปูนปลาสเตอร์ใช้แล้ว

2.16 สารช่วยกระจายตัว

ในการเตรียมน้ำสลิปทุกครั้งจะมีการเติมเกลือบางชนิดที่สามารถเกิดการแตกตัวให้โซเดียมไอออน (Na^+) เนื่องด้วยโซเดียมไอออนเป็นไอออนที่มีขนาดใหญ่ มีประจุบวกต่ำ สามารถเข้าไปรบกวนโครงสร้างแบบเจลของน้ำสลิปได้ โดยโซเดียมไอออนจะเกาะยึดกับโครงสร้างแบบเจลได้ไม่แน่นทำให้โครงสร้างจับกันแบบหลวมทำให้อนุภาคเกิดการแขวนลอยได้ดีหรือส่งผลให้น้ำสลิปมีการไหลตัวได้ดี ในทางตรงกันข้าม ไอออนที่มีประจุบวก อย่างเช่น แคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) แมกนีเซียมไอออน (Mg^{2+}) หรืออะลูมิเนียมไอออน (Al^{3+}) ซึ่งเป็นไอออนที่มีประจุสูงและมีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็ก จึงเข้าไปยึดกับโครงสร้างแบบเจลในน้ำสลิปได้แน่น ทำให้น้ำสลิปมีความข้นไหลตัวยากและตกตะกอน การเลือกเติมสารช่วยกระจายตัวที่สามารถแตกตัวให้โซเดียมไอออนมีหลายชนิด ยกตัวอย่างเช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โซเดียมคลอไรด์หรือเกลือแกง (NaCl) โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) เป็นต้น แต่ส่วนมากในทางเซรามิกมักจะเลือกเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกตเป็นสารช่วยกระจายตัว (Deflocculant) ในน้ำสลิป ด้วยเหตุผลที่ว่า

- 1) การเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์จะไปรบกวนความเป็นกรดเบสของน้ำสลิป
- 2) การเติมโซเดียมคลอไรด์หรือเกลือแกงจะทำให้ได้คลอไรด์ไอออน (Cl^-) ซึ่งกำจัดออกจากน้ำสลิปได้ยาก
- 3) โซเดียมซัลเฟตจะแตกตัวให้ซัลเฟตไอออน (SO_4^{2-}) ซึ่งเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม
- 4) โซเดียมซิลิเกตแตกตัวให้ซิลิเกตไอออน (SiO_3^{2-}) ซึ่งไม่ส่งผลกระทบต่อระบบน้ำสลิป เพราะวัสดุดิบในน้ำสลิปล้วนเป็นสารประกอบจำพวกซิลิเกต

เห็นได้ว่าการเติมสารช่วยกระจายตัวจะต้องคำนึงถึงไอออนลบที่แตกตัวออกมาพร้อมกับโซเดียมไอออนด้วย อีกทั้งยังต้องคำนึงถึงปริมาณของสารช่วยกระจายตัวที่เติมเข้าไป หากเติมเข้าไปในปริมาณที่มากจะทำให้มีโซเดียมไอออนส่วนเกินซึ่งกำจัดออกจากน้ำสลิปได้ยาก ส่งผลให้ชั้น Double layer ที่ล้อมรอบอนุภาคบางลง ทำให้อนุภาคไม่เกิดการแขวนลอยอย่างเสถียรในน้ำสลิป วิธีการที่ถูกต้องในการเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกตลงในน้ำสลิป คือ ให้ละลายโซเดียมซิลิเกตให้เจือจางแล้วค่อย ๆ เติมสารละลายโซเดียมซิลิเกตลงไปทีละน้อย เพื่อให้เกิดการแขวนลอยได้อย่างเสถียร การเติมไอออนที่มีประจุไปจับกับอนุภาคน้ำสลิปนี้จะเรียกว่า อิเล็กโตรสแตติกสเตบิไลเซชัน (Electrostatic stabilization) อีกเหตุผลข้อหนึ่งเกี่ยวกับการเติมโซเดียมซิลิเกต คือ ซิลิเกตไอออนที่แตกตัวจากโซเดียมซิลิเกตสามารถไปจับกับแมกนีเซียมไอออนหรือแคลเซียมไอออนได้ โดยปกติมักจะปนอยู่ในรูปของสารเจือปน (Impurity) ในน้ำสลิป ทำให้เกิดเป็นเกลือของแมกนีเซียมซิลิเกต (MgSiO_3) หรือแคลเซียมซิลิเกต (CaSiO_3) ซึ่งไม่ละลายน้ำ ส่งผลให้อนุภาคในน้ำสลิปแขวนลอยอย่างเสถียรและไหลตัวดีขึ้น ในทางกลับกันเมื่อน้ำสลิปมีการไหลตัวดีเกินไป เราสามารถแก้ไขได้โดยการ

เติมเกลือพวกที่สามารถแตกตัวให้อิออนที่มีประจุสองบวกหรือสามบวก อย่างเช่น แคลเซียมซัลเฟต (CaSO_4) แมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) แคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2) แมกนีเซียมคลอไรด์ (MgCl_2) เป็นต้น แต่ในทางเซรามิกจะนิยมเลือกเติมเกลือซัลเฟต เนื่องจากซัลเฟตอิออนมีส่วนทำให้น้ำสลิปตกตะกอนเหนียวขึ้น และหากเกิดข้อผิดพลาดในการเติมที่มากเกินไป สามารถกำจัดได้โดยการเติมแบเรียมไฮดรอกไซด์ (Ba(OH)_2) เพราะแบเรียมอิออน (Ba^{2+}) ที่แตกตัวจากแบเรียมไฮดรอกไซด์สามารถไปจับตัวกับซัลเฟตอิออนได้เป็นเกลือแบเรียมซัลเฟต (BaSO_4) ที่ไม่ละลายน้ำออกมา ในขณะที่การใช้แบเรียมคลอไรด์ (BaCl_2) หรือแมกนีเซียมคลอไรด์จะเป็นผลเสียต่อน้ำสลิปได้ เพราะไม่สามารถกำจัดคลอไรด์อิออนส่วนเกินออกจากน้ำสลิปได้ และเกลือคลอไรด์เกือบทุกชนิดจะละลายน้ำ

อีกวิธีในการทำให้น้ำสลิปมีการกระจายตัวที่ดี คือ การเติมสารประกอบจำพวกพอลิเมอร์เข้าไปในน้ำสลิป โดยสารประกอบพวกนี้จะทำหน้าที่เคลือบรอบอนุภาคเซรามิกและอิออนที่ทำให้ตกตะกอนในน้ำสลิป ทำให้อนุภาคเกิดการกระจายตัวหรือแขวนลอยอย่างเสถียรในน้ำสลิปด้วยวิธีเรียกวินี้ว่า สเตอริกสเตบิไลเซชัน (Steric stabilization) แต่เมื่อทำการตีควนน้ำสลิปแรง ๆ จะทำให้อิออนที่ทำให้ตกตะกอนแยกตัวออกมาจากพอลิเมอร์กลับไปเกาะรอบ ๆ อนุภาคดินอีกที อาจทำให้พฤติกรรมของน้ำสลิปเปลี่ยนไปได้ และวิธีการแบบนี้จะทำให้เกิดภาวะในการเผาไล่พอลิเมอร์อีกด้วย แต่ในปัจจุบันจะนิยมทำในลักษณะวิธีกึ่งอิเล็กโตรสแตติกสเตบิไลเซชันกับสเตอริกสเตบิไลเซชัน ซึ่งเรียกรวมกันว่า อิเล็กโตรสเตอริกสเตบิไลเซชัน (Electrosteric stabilization)^[40]

2.17 สารก่อโฟม

สารก่อโฟม (Foaming agent)^[26, 27] เป็นสารที่ทำให้เกิดฟองโฟมด้วยการลดแรงตึงผิวของสารละลาย ในปัจจุบันการผลิตคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบกักฟองอากาศ (Cellular lightweight concrete) มีการใช้ผสมสารลดแรงตึงผิว (Surfactant) เมื่อคอนกรีตแข็งตัว ฟองอากาศเหล่านั้นจะกลายเป็นช่องว่างอากาศที่มีขนาดเล็กรวมตัวกัน เมื่อแข็งตัวจะกลายเป็นอิฐคอนกรีตที่มีรูพรุน และมีความแข็งแรง การจำแนกสารก่อโฟมสามารถจำแนกได้จากแหล่งที่มาและอัตราการขยายตัวของฟองโฟม ประกอบกับการตรวจสอบคุณภาพ สามารถอธิบายได้ดังนี้

2.17.1 สารก่อโฟมจากโปรตีน^[26] สามารถจำแนกได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้

- 1) โฟมโปรตีนจากการสกัดโปรตีนจากสัตว์ มีลักษณะสีน้ำตาลเข้ม มีกลิ่นแรง ผลิตขึ้นมาโดยการหมักโปรตีนจากส่วนแข็งของสัตว์ เช่น กีบ เขาสัตว์ เป็นต้น ซึ่งเมื่อย่อยสลายจะให้เนื้อโฟมคุณภาพสูง แต่ไม่สามารถเก็บไว้นานได้เนื่องจากมีปัญหาในเรื่องการบูดเน่า กลิ่นเหม็น ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีกลิ่นของโฟมติดด้วย ซึ่งในปัจจุบันไม่เป็นที่นิยม

2) โฟมโปรตีนจากพืช มีลักษณะสีใส มีส่วนผสมของสารลดความตึงผิว ไม่มีกลิ่น เนื้อโฟมคุณภาพสูง โดยมีการเติมสารบางชนิดเพื่อเพิ่มคุณสมบัติพิเศษต่าง ๆ รวมทั้งสมบัติในเรื่องความต้านทานการกัดกร่อน ความต้านทานการสลายตัวของแบคทีเรีย และการควบคุมความชื้น สามารถเก็บไว้ได้นานจะไม่มีปัญหาในเรื่องการบูดเน่า กลิ่นเหม็น โดยในปัจจุบันเป็นที่นิยมใช้อย่างแพร่หลาย

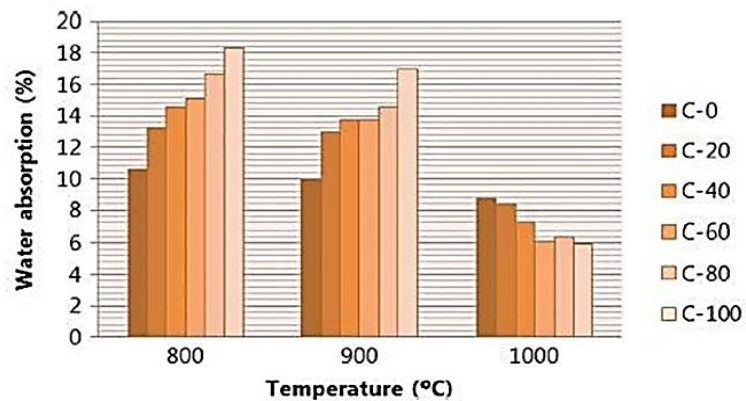
2.17.2 สารก่อโฟมจำแนกตามอัตราการขยายตัว สามารถจำแนกได้เป็น 3 ประเภท ดังนี้

- 1) สารก่อโฟมอัตราขยายตัวต่ำ มีการขยายตัวประมาณ 20 เท่า
- 2) สารก่อโฟมอัตราขยายตัวปานกลาง มีการขยายตัวที่มากกว่า 20-200 เท่า
- 3) สารก่อโฟมอัตราขยายตัวสูงมีการขยายตัวจาก 200-1,000 เท่า

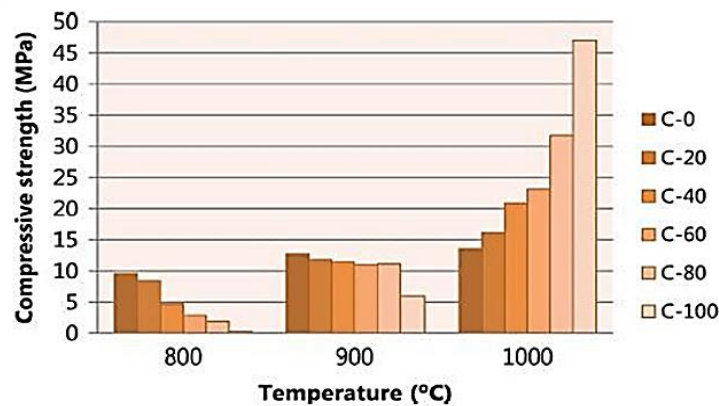
2.17.3 คุณภาพของสารก่อโฟม สามารถตรวจสอบได้จากอัตราการขยายตัว และความหนาแน่นของโฟม ควรมีความหนาแน่นอยู่ระหว่าง 40 ถึง 60 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โฟมที่มีความหนาแน่นมากกว่านี้มีแนวโน้มจะแยกชั้น เนื่องจากโฟมไม่สามารถอุ้มน้ำได้ โฟมจะแตกตัวเป็นฟองขนาดใหญ่ขึ้นและน้ำจะแยกตัวออกอยู่ด้านล่าง ลักษณะฟองโฟมที่ดีต้องไม่แยกตัวเมื่อตั้งทิ้งไว้ประมาณ 15 นาที ก่อนจะนำไปผสมให้เข้ากับซีเมนต์ในขั้นตอนสุดท้าย ซึ่งถ้าผสมนานเกินไปจะทำให้ฟองโฟมแตก ปริมาณของรูพรุนภายในชิ้นงานก็จะลดลงตามไปด้วย

2.18 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

C. Leiva และคณะ^[41] ได้ทำการศึกษาอัตราส่วนของเถ้าลอยตั้งแต่ ร้อยละ 0-100 โดยน้ำหนัก ผสมกับดิน และใช้น้ำเป็นตัวประสาน ขึ้นรูปเป็นอิฐด้วยความดัน 10 เมกะพาสคัล เเผที่อุณหภูมิต่างกัน ได้แก่ 800 900 และ 1000 องศาเซลเซียส ระยะเวลาไฟ 8 ชั่วโมง จากผลการศึกษาพบว่า เมื่อเพิ่มเถ้าลอยในอัตราส่วนเพิ่มขึ้น การดูดซึมน้ำมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ความแข็งแรงกลับลดลง เมื่อเผที่อุณหภูมิ 800 และ 900 องศาเซลเซียส แต่การเผาชิ้นงานที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส การดูดซึมน้ำมีค่าลดลง และความแข็งแรงมีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนของเถ้าลอย ดังนั้นในการนำไปใช้งานเกี่ยวกับการเติมเถ้าลอยควรเผที่อุณหภูมิ 900 และ 1000 องศาเซลเซียส เพื่อให้มีสมบัติตามมาตรฐานอิฐก่อสร้างยุโรป (EN771-2) โดยสมบัติของชิ้นงานที่มีการเติมเถ้าลอยในอัตราส่วนต่างกัน และเผที่อุณหภูมิต่างกัน แสดงในภาพที่ 2.24



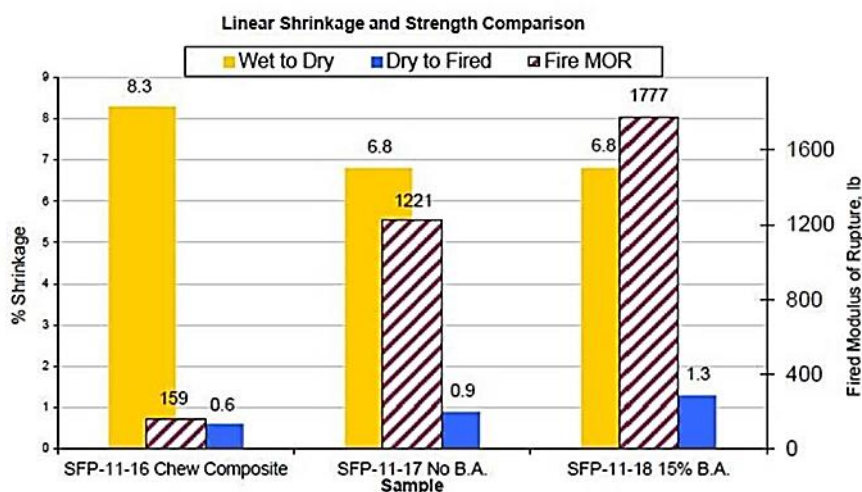
(ก)



(ข)

ภาพที่ 2.24 สมบัติของชิ้นงานที่มีการเติมเถ้าลอยในอัตราส่วนต่างกันและเผาชิ้นงานที่อุณหภูมิต่างกัน ประกอบด้วย (ก) ค่าดูดซึมน้ำ และ (ข) ความแข็งแรง^[41]

G. V Tayler และคณะ^[42] ได้ทำการเตรียมอิฐจากดินเหนียวและทรายผสมกับเถ้าหนัก โดยขึ้นรูปชิ้นงานเปรียบเทียบกับอิฐดินเหนียวกับทราย โดยสูตรที่ผสมเถ้าหนักใช้เถ้าหนัก ร้อยละ 15 ดินเหนียว ร้อยละ 53 และทราย ร้อยละ 32 โดยน้ำหนัก และสูตรอิฐที่ใช้ดินเหนียวผสมทราย ใช้ดินเหนียว ร้อยละ 60 และทราย ร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก จากการศึกษพบว่าเถ้าหนักช่วยเพิ่มความแข็งแรงต่อการโค้งงอ ช่วยลดการหดตัวของชิ้นงานอิฐ และการเติมเถ้าหนักในปริมาณ ร้อยละ 35 โดยน้ำหนัก อิฐมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 2.25

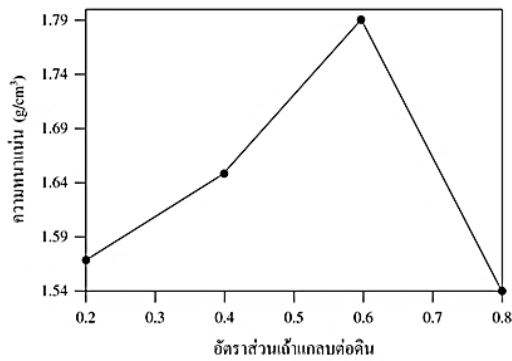


ภาพที่ 2.25 สมบัติการหดตัวและความแข็งแรงของชิ้นงานของ ประกอบด้วย

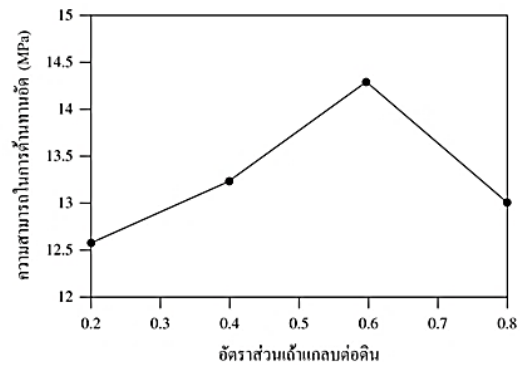
(ก) SEP-11-16 Chew Composite (ข) SEP-11-17 No B.A. และ (ค) SEP-11-18 15% B.A.^[42]

สุทัศน์และคณะ^[43] ได้ทำการศึกษาส่วนผสมที่เหมาะสมของอิฐดินเผา โดยได้เลือกกลุ่มผู้ผลิตอิฐดินเผาจากทั้ง 3 ตำบล ได้แก่ ตำบลโพกรวม ตำบลบางกระปือ และตำบลต้นโพธิ์ จากผลการทดสอบสมบัติของอิฐดินเผา พบว่าอิฐดินเผาที่ผลิตในตำบลโพกรวมและตำบลบางกระปือมีสมบัติการดูดซึมน้ำและความต้านทานแรงอัดไม่ผ่านมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมอิฐก่อสร้างสามัญ แต่อิฐดินเผาที่ผลิตในตำบลต้นโพธิ์มีการดูดซึมน้ำที่ผ่านมาตรฐานแต่ในขณะความต้านทานแรงอัดต่ำกว่ามาตรฐาน คณะผู้วิจัยได้ทำการศึกษาส่วนผสมที่เหมาะสมระหว่างเถ้าแกลบกับดิน ในช่วงอัตราส่วน 0.2-0.8 โดยปริมาตร จากผลการศึกษารูปได้ว่าการเติมเถ้าแกลบในอัตราส่วน 0.6 ส่งผลให้ชิ้นงานมีความหนาแน่น และความต้านทานแรงอัดได้สูงสุด ดังแสดงในภาพที่ 2.26

Sutcu และคณะ^[31] ได้ทำการศึกษาผลของผงหินอ่อนต่อสมบัติของอิฐดินเผา โดยการเติมผงจากหินอ่อนตั้งแต่ ร้อยละ 5-35 โดยน้ำหนัก ชิ้นรูปชิ้นงานในแบบพิมพ์ด้วยความดัน 40 เมกะพาสคัล เผาชิ้นงานที่อุณหภูมิต่างกัน ได้แก่ 950 และ 1050 องศาเซลเซียส จากผลการศึกษาพบว่าผงหินอ่อนส่งผลให้ความหนาแน่นและความต้านทานแรงอัดลดลง ทำให้การนำความร้อนลดลงตามไปด้วย ตามปริมาณของผงหินอ่อนที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 2.27



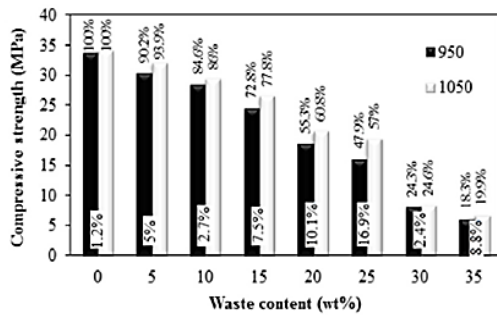
(ก)



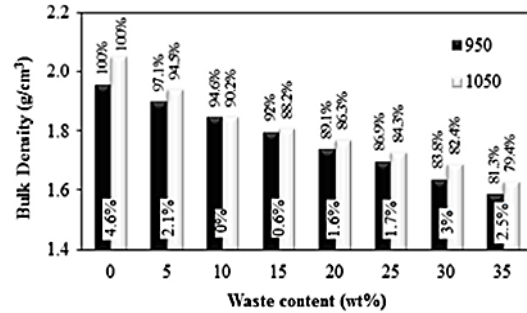
(ข)

ภาพที่ 2.26 สมบัติของอิฐดินเผาที่มีการเติมเถ้าแกลบในอัตราส่วนต่างกัน ประกอบด้วย

(ก) ความหนาแน่น และ (ข) ความต้านทานแรงอัด^[43]



(ก)



(ข)

ภาพที่ 2.27 ผลจากการเติมผงหินอ่อนต่อสมบัติของอิฐดินเผา ประกอบด้วย (ก) ความต้านทาน

แรงอัด และ (ข) ความหนาแน่น^[31]

Dermirl และคณะ^[33] ได้ทำการศึกษาการนำเยื่อกระดาษที่เหลือจากโรงงานอุตสาหกรรมกระดาษ ซึ่งมีไฟเบอร์เป็นองค์ประกอบหลัก โดยนำมาเป็นส่วนผสมในการเตรียมอิฐมวลเบา เติมน้ำในส่วน ร้อยละ 2.5-10 โดยน้ำหนัก แสดงในกลุ่มตัวอย่าง A-D ตามลำดับ โดยขึ้นงานขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดรีด มีตารางการเผาขึ้นงานโดยเริ่มต้นด้วยอัตราการให้ความร้อน 2 องศาเซลเซียสต่อนาที จนถึงอุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส จากนั้นเปลี่ยนเป็นอัตราการให้ความร้อน 5 องศาเซลเซียสต่อนาที จนถึงอุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส มีระยะเย็นไฟ 30 นาที จากผลการศึกษาพบว่า การเติมเยื่อกระดาษซึ่งเป็นวัตถุดิบที่ไม่มีความเหนียว เมื่อเติมเข้าไปส่งผลให้ดินมีความเหนียวลดลง และเยื่อกระดาษดูดซับน้ำได้ดี หลังจากเผาขึ้นงานที่มีการเติมเยื่อกระดาษ ร้อยละ 10 (ตารางที่ 2.10 ตัวอย่างกลุ่ม D) เยื่อกระดาษส่งผลให้ขึ้นงานมีความพรุนตัวเพิ่มขึ้นเท่ากับ ร้อยละ 52 และการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นตามเป็น ร้อยละ 37.14 ในขณะที่ความหนาแน่นลดลงเท่ากับ 1.40 กรัมต่อลูกบาศก์-

เซนติเมตร ส่งผลต่อความต้านทานแรงอัดที่ลดลงตามมาเท่ากับ 9.5 เมกะพาสคัล สมบัติทางกายภาพของอิฐมวลเบาที่มีเติมเยื่อกระดาษ แสดงผลดังตารางที่ 2.10

ตารางที่ 2.10 สมบัติทางกายภาพของอิฐมวลเบาที่มีเติมเยื่อกระดาษ^[33]

Mechanical properties	Sample series			
	A	B	C	D
Apparent porosity (%)	30	35	41	52
Bulk density (g/cm ³)	1.82	1.49	1.43	1.40
Apparent density (%)	2.42	1.96	1.85	1.80
Water absorption (%)	14.46	23.47	28.66	37.14
Compressive strength (Kg/cm ²)	1.55	12.8	11.2	9.5

Norlia Mohamad Ibrahim และคณะ^[44] ได้ทำการศึกษานำวัสดุเหลือใช้จากอิฐดินเผา มาใช้สำหรับอิฐมวลเบาที่มีโพมเป็นองค์ประกอบ โดยการเติมวัสดุเหลือใช้จากอิฐดินเผา ร้อยละ 25-100 โดยน้ำหนัก จากผลการศึกษาพบว่า การเติมวัสดุเหลือใช้จากอิฐดินเผา ส่งผลให้ชิ้นงานอิฐมวลเบา มีความหนาแน่นลดลง ส่งผลให้ความต้านทานแรงอัดลดลงตามไปด้วย ในขณะที่การดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นตามปริมาณที่เติม ดังแสดงในตารางที่ 2.11

ตารางที่ 2.11 ความหนาแน่นและการดูดซึมน้ำของอิฐมวลเบาที่นำวัสดุเหลือใช้จากอิฐดินเผา มาใช้ในสัดส่วนที่ต่างกัน^[44]

Waste clay brick (%)	Bulk density (kg/m ³)		Water absorption (%)
	Before 24 hr	After 24 hr	
Control	1684	1452	15.98
25	1666	1436	16.02
50	1760	1513	16.33
75	1884	1605	17.38
100	1870	1568	19.26

พิมพ์รักษาและคณะ^[45] ได้ทำการเตรียมอิฐมวลเบาที่มีส่วนผสมของดินเบา ปูนขาว และยิปซั่ม ในอัตราส่วนแตกต่างกัน ขึ้นรูปด้วยการอัดด้วยความดัน 3.5 เมกะพาสคัล ชิ้นงานหลังขึ้นรูปฝังไว้ที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นอบชิ้นงานที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส ในระบบอบไอน้ำ เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากผลการศึกษาพบว่า สู้ตรดินเบา ปูนขาว และยิปซั่ม ในอัตราส่วน 70:15:15 มีการดูดซึมน้ำ

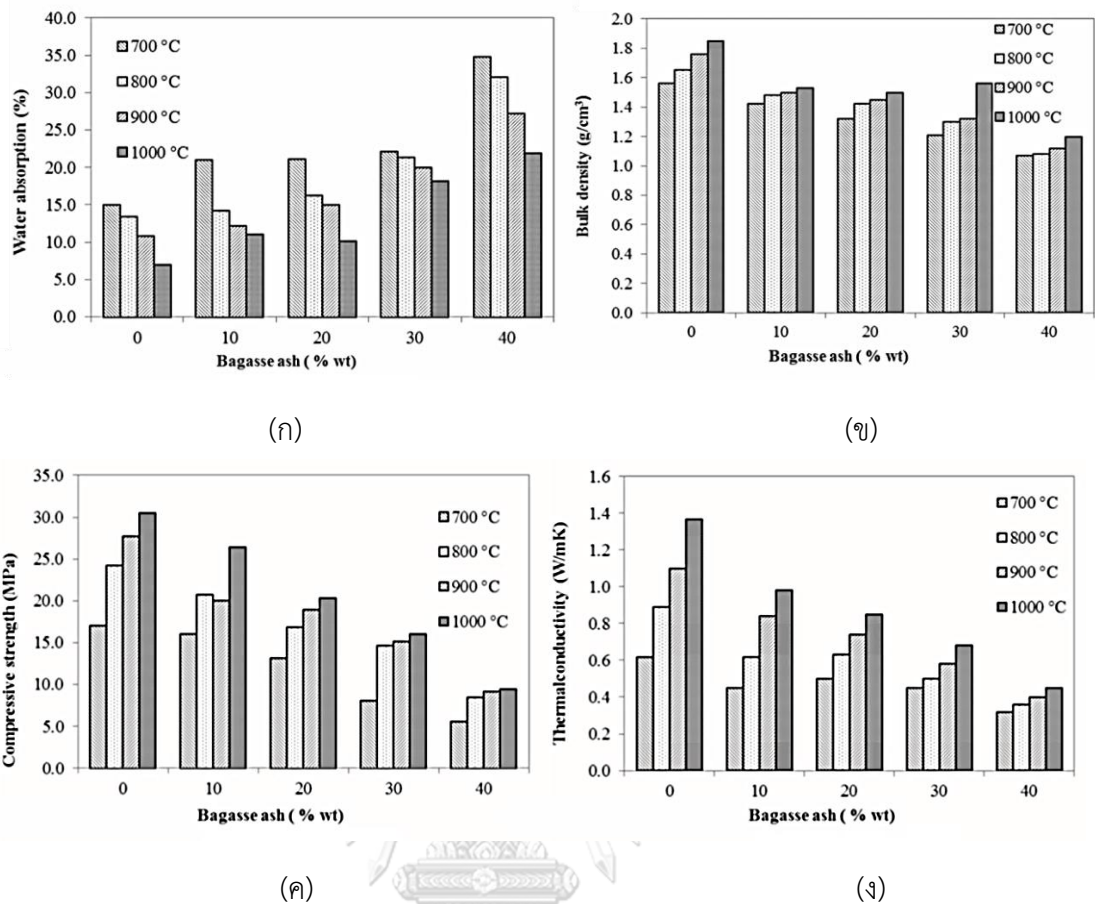
ต่ำสุดเท่ากับ ร้อยละ 32 และมีความต้านทานแรงอัดมากที่สุดเท่ากับ 18.0 เมกะพาสคัล แต่ความหนาแน่นเท่ากับ 1.02 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งความหนาแน่นต่ำสุดเป็นสูตรดินเบา ปูนขาว และยิปซัม ในอัตราส่วน 80:15:5 โดยผลของอัตราส่วนต่างกับสมบัติของอิฐมวลเบา แสดงผลดังตารางที่ 2.12

ตารางที่ 2.12 ผลของอัตราส่วนระหว่างดินเบา ปูนขาว และยิปซัม ในอัตราส่วนต่างกับสมบัติของอิฐมวลเบา

LDE:Lime:Gypsum (Ca/Si)	Bulk density (g/cm ³)	Water absorption (%)	Compressive strength (MPa)
80:20:0 (0.32)	1.27	47	15.5
80:15:5 (0.32)	0.88	66	14.5
75:15:10 (0.42)	0.97	57	15.5
70:15:15 (0.55)	1.02	32	18.0

กัญญากานต์และคณะ^[46] ได้ทำการศึกษาลักษณะสมบัติของวัสดุก่อสร้างที่มียิปซัมเป็นองค์ประกอบ โดยใช้แบบพิมพ์ปูนปลาสเตอร์ใช้แล้วและเศษแก้วกระจกรถยนต์ แบบพิมพ์ปูนปลาสเตอร์ที่ใช้แล้วเป็นแหล่งของแคลเซียมซิลิเฟตที่มีความบริสุทธิ์สูง ในขณะที่เดียวกันเศษแก้วได้จากการคัดกรองจากโรงงานผลิตยานยนต์ที่ได้มาจากกระบวนการตัดเฉือนกระจกและติดตั้งกระจกเนื่องด้วยเศษผงแก้วประกอบด้วย ซิลิกา จากวัตถุดิบข้างต้นจะถูกผสมและขึ้นรูปโดยกำหนดสัดส่วนของแบบพิมพ์ปูนปลาสเตอร์ใช้แล้วและเศษผงแก้วตั้งแต่ ร้อยละ 0-20 โดยน้ำหนัก จากผลการศึกษาพบว่า ผงเศษแก้วที่เติมลงในแบบพิมพ์ปูนปลาสเตอร์ใช้แล้วสามารถเพิ่มความแข็งแรงได้

สุทัศน์และคณะ^[32] ได้ทำการศึกษาอิฐดินเผามวลเบาจากอิฐดินเผาแบบดั้งเดิมโดยใช้เถ้าชานอ้อยเป็นส่วนผสม โดยการเติมเถ้าชานอ้อยตั้งแต่ ร้อยละ 10-40 โดยน้ำหนัก ผสมกับดินเผาที่อุณหภูมิต่างกัน ได้แก่ 700 800 900 และ 1000 องศาเซลเซียส จากผลการศึกษาพบว่า เถ้าชานอ้อยมีผลต่อความพรุนตัวและการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความหนาแน่นและความต้านทานแรงอัดลดลงตามสัดส่วนของเถ้าชานอ้อยที่เพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการเผา ความพรุนตัวและการดูดซึมน้ำลดลง และในทางกลับกันความหนาแน่นของชิ้นงานอิฐเพิ่มขึ้น ส่งผลต่อความต้านทานแรงอัดเพิ่มตาม สรุปได้ว่า อิฐดินเผามวลเบาที่มีเถ้าชานอ้อย ร้อยละ 40 เผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส มีค่าการดูดซึมน้ำ ร้อยละ 21.19 ความหนาแน่น 1.2 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ความต้านทานแรงอัด 9.42 เมกะพาสคัล และการนำความร้อน 0.45 วัตต์ต่อเมตรเคลวิน ซึ่งผ่านมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมอิฐมวลเบา มอก.2601-2556 ดังแสดงในภาพที่ 2.28



ภาพที่ 2.28 ผลของเถ้าชานอ้อยต่อสมบัติทางกายภาพของอิฐดินเผามวลเบา ประกอบด้วย (ก) การดูดซึมน้ำ (ข) ความหนาแน่น (ค) ความต้านทานแรงอัด และ (ง) การนำความร้อน^[32]

จิราพรและคณะ^[25] ได้ทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเถ้าหนักลิคนัดจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง มาใช้แทนที่ดินเหนียวบางส่วนในการผลิตอิฐทนไฟ ด้วยเถ้าหนักลิคนัดมีองค์ประกอบของอะลูมินาและซิลิกาสูง จึงเป็นวัตถุดิบที่ใช้แทนแร่อะลูมิโนซิลิเกตในดินเหนียวได้โดยศึกษาความสามารถในการเติมเถ้าหนักลิคนัดในช่วง ร้อยละ 30 ถึง 70 โดยน้ำหนัก ขึ้นงานอิฐขึ้นรูปด้วยการอัดด้วยส่วนผสมของเถ้าหนักลิคนัด ดินเหนียวและอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ เผาขึ้นงานที่อุณหภูมิ 1300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และทดสอบสมบัติของขึ้นงาน ได้แก่ ความหนาแน่น ความพรุนตัว ความแข็งแรง และสมบัติทางความร้อน จากการทดสอบพบว่า ค่าความพรุนเพิ่มขึ้นจาก ร้อยละ 35 เป็น ร้อยละ 45 เมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าหนักลิคนัด ในขณะที่ความแข็งแรงและการนำความร้อนของอิฐลดลงเมื่อปริมาณเถ้าหนักลิคนัดเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากปริมาณรูพรุนที่เพิ่มขึ้น จากผลการทดสอบเบื้องต้นมีความเป็นไปได้ของการนำเถ้าหนักลิคนัดมาใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตอิฐทนไฟควบคู่กับความร้อนได้

อนุชาและคณะ^[47] ได้ทำการเตรียมอิฐดินเผามวลเบาจากดินราชบุรี โดยใช้เศษปูนปลาสเตอร์เป็นส่วนผสมในการผลิต มีการเติมโซเดียมซิลิเกตและสารก่อโฟม จากการเตรียมชิ้นงานพบว่าสามารถเตรียมชิ้นงานได้ขนาดเทียบเท่ากับขนาดของอิฐมอญ ดังภาพที่ 2.29 โดยสูตร (NB24) ที่มีส่วนผสมของดินเหนียวราชบุรี ร้อยละ 80 เศษปูนปลาสเตอร์ ร้อยละ 11.54 โซเดียมซิลิเกต ร้อยละ 8.46 และสารก่อโฟม ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก เผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส มีความหนาแน่นรวม 1.03 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ความต้านทานแรงอัด 0.46 เมกะพาสคัล และการดูดซึมน้ำ ร้อยละ 41.2 ในขณะที่สูตร (NB28) ที่มีส่วนผสมของดินเหนียวราชบุรี ร้อยละ 80 เศษปูนปลาสเตอร์ ร้อยละ 10 โซเดียมซิลิเกต ร้อยละ 10 และสารก่อโฟม ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก เผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส มีความหนาแน่นรวม 1.32 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตรความทนต่อแรงอัด 4.43 เมกะพาสคัล และการดูดซึมน้ำ ร้อยละ 32.08



ภาพที่ 2.29 อิฐดินเผามวลเบาสูตร ประกอบด้วย (ก) สูตร NB24 และ (ข) สูตร NB28^[47]

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการขึ้นรูปชิ้นงานของสูตรอิฐดินเผาและสูตรอิฐมวลเบาที่มีส่วนผสมของเถ้าหนักลิกไนต์และสารก่อโฟม ด้วยเทคนิคการขึ้นรูปด้วยมือ โดยออกแบบสูตรอิฐมวลเบาจากการกำหนดสัดส่วนของวัตถุดิบตั้งต้น ได้แก่ ดินราชบุรี เถ้าหนักลิกไนต์ และแบบพิมพ์ปูนปลาสเตอร์ใช้แล้วต่อโซเดียมซิลิเกต ในอัตราส่วนที่ต่างกัน ประกอบกับการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีและองค์ประกอบเฟสของเถ้าหนักลิกไนต์ ออกแบบตารางการอบแห้งและอุณหภูมิการเผา เพื่อให้ได้อิฐมวลเบาที่มีความหนาแน่นต่ำ เมื่อได้ชิ้นงานอิฐมวลเบาจะนำไปทดสอบสมบัติทางกายภาพของชิ้นงานตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมอิฐบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ มอก.2601-2556^[3] ได้แก่ การหัดตัวหลังอบแห้งและหลังเผา การดูดซึมน้ำ ความหนาแน่น ความต้านทานแรงอัด ความเหนียวของเนื้อดิน และวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของชิ้นงาน ได้แก่ สีของชิ้นงาน การนำความร้อนของชิ้นงาน องค์ประกอบเฟส และโครงสร้างจุลภาค เมื่อได้สูตรที่เหมาะสมจะนำไปขึ้นรูปชิ้นงานขนาดเทียบเท่ากับผลิตภัณฑ์อิฐก่อสร้างสามัญ

3.1 วัตถุดิบและสารเคมี เครื่องมือและอุปกรณ์

วัตถุดิบและสารเคมี เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตอิฐดินเผาและอิฐมวลเบาแสดงรายละเอียดในตารางที่ 3.1-3.2 และแสดงในภาพที่ 3.1-3.2 มีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ 3.1 รายละเอียดของวัตถุดิบและสารเคมี

วัตถุดิบและสารเคมี	ชื่อทางการค้า	แหล่งที่มา
ดินราชบุรี	-	ราชบุรี
เถ้าหนักลิกไนต์	-	โรงไฟฟ้าแม่เมาะ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย
แบบพิมพ์ปูนปลาสเตอร์ใช้แล้ว	-	ภาควิชาวัสดุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
โซเดียมซิลิเกต	-	ช. เคมีไทย
สารก่อโฟม	Fo-mix	-



(ก)

(ข)

(ค)

ภาพที่ 3.1 วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตอิฐดินเผาและอิฐมวลเบา ประกอบด้วย (ก) ดินราชบุรี (ข) ถ้ำหนักกลไกไนต์ และ (ค) แบบพิมพ์ปูนพลาสติกอร์ใช้แล้ว (บดหยาบ)

ตารางที่ 3.2 รายละเอียดของเครื่องมือและอุปกรณ์

เครื่องมือและอุปกรณ์	ผู้ผลิต	แบบ/รุ่น
เครื่องบดแบบสั่น (หม้อบดแบบทั้งสแตนคาร์ไบด์)	FRITSCH	-
เครื่องปั่นผสมวัตถุดิบ (หม้อปริมาตร 2 ลิตร และใบพัดแบบตะกร้อ)	HOMEMATE	HOME-158122
เครื่องปั่นฟองโฟม (แท่งปั่นแบบใบพัด)	IKA	-
บีกเกอร์พลาสติก (ปริมาตร 50 ถึง 5000 มิลลิลิตร)	-	-
ไม้พายสำหรับกวนดิน	-	-
ตะแกรงร่อน (ขนาด 100 เมช และ 200 เมช)	RAMA	-
แบบพิมพ์อะคริลิก (ขนาดช่อง 50x50x50 มิลลิเมตร)	-	-
ตู้อบไฟฟ้า (อุณหภูมิสูงสุด 300 องศาเซลเซียส)	Memmert	UN-75
เตาเผาไฟฟ้า (อุณหภูมิสูงสุด 1250 องศาเซลเซียส)	KI	-
เวอร์เนียคาลิเปอร์แบบดิจิตอล (Vernier caliper) (ความละเอียด 0.01 มิลลิเมตร)	Mitutoyo	-
เครื่องชั่งน้ำหนักแบบไฟฟ้า (ทศนิยม 2 ตำแหน่ง)	Sartorius	ED3202S
เครื่องชั่งน้ำหนักแบบไฟฟ้า (ทศนิยม 3 ตำแหน่ง) ชุดทดสอบอาร์คิมิดีส (Archimedes test equipment)	ALFA MIRAGE	MDS-300



(ก)

(ข)

(ค)

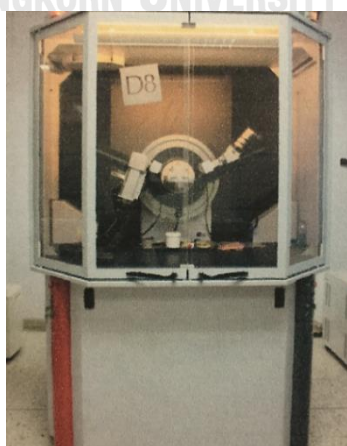
ภาพที่ 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตอิฐดินเผาและอิฐมวลเบา ประกอบด้วย
(ก) เครื่องปั่นผสมวัสดุ (ข) เครื่องปั๊มโฟม และ (ค) แบบพิมพ์อะคริลิก

3.2 การวิเคราะห์ของวัสดุตั้งต้น

ในขั้นตอนการวิเคราะห์วัสดุตั้งต้น มีการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

3.2.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี โดยวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุตั้งต้น ได้แก่ ดินราชบุรี เถ้าหนักลิกไนต์ และแบบพิมพ์ปูนปลาสเตอร์ใช้แล้ว ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์ (X-ray fluorescence) ผลิตโดยบริษัท Philips รุ่น PW2400

3.2.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบเฟส โดยวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสของเถ้าหนักลิกไนต์ เพื่อศึกษาองค์ประกอบเฟสด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction) ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (X-ray diffractometer) ดังภาพที่ 3.3 ผลิตโดยบริษัท Bruker รุ่น D8 Advanced โดยใช้ $\text{Cu-K}\alpha$ radiation ช่วง 2θ เท่ากับ 10-80 องศา



ภาพที่ 3.3 เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (X-ray diffractometer)

3.2.3 การวิเคราะห์ขนาดอนุภาค โดยวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของวัสดุบดตั้งต้น ได้แก่ ดินราชบุรี เถ้าหนักลิกไนต์ และแบบพิมพ์ปูนปลาสเตอร์ใช้แล้ว โดยผ่านตะแกรงร่อน 100 เมช โดยไม่บดซึ่งวัสดุบดข้างต้นที่กระจายตัวในน้ำกลั่นขณะที่ทำการวิเคราะห์ โดยวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Dynamic laser light scattering techniques ดังภาพที่ 3.4 รุ่น Mastersizer 2000 ผลิตโดยบริษัท Malvern Instruments Corp.



ภาพที่ 3.4 เครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาค

3.3 การเตรียมวัสดุบดและการออกแบบสูตรส่วนผสม

ในการเตรียมวัสดุบดและการออกแบบสูตรส่วนผสม มีรายละเอียดดังนี้

3.3.1 การเตรียมวัสดุบด นำวัสดุบดตั้งต้น ได้แก่ ดินราชบุรี เถ้าหนักลิกไนต์ และแบบพิมพ์ปูนปลาสเตอร์ใช้แล้ว มาบดละเอียดด้วยเครื่องบดแบบสั่น (Vibratory mill) ดังภาพที่ 3.5 และผ่านตะแกรงร่อนขนาด 100 เมช



ภาพที่ 3.5 เครื่องบดแบบสั่น (Vibratory mill) และหม้อบดแบบถังสแตนคาร์ไบด์

3.3.2 การออกแบบสูตรส่วนผสม ในการออกแบบสูตรอิฐดินเผาและสูตรอิฐมวลเบา ได้ออกแบบสูตรจากการคำนวณองค์ประกอบทางเคมีจากตารางที่ 4.1 ซึ่งแสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบตั้งต้น โดยศึกษาความสามารถในการเติมเถ้าหนักลิแกนด์แทนที่ดินราชบุรี ศึกษาความสามารถในการเติมปูนปลาสเตอร์ให้ทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมซิลิเกตในอัตราส่วน 1:1 จากสมการที่ 1.1 ในระบบน้ำดิน (ดินราชบุรีต่อน้ำ ร้อยละ 100:80 โดยน้ำหนัก ซึ่งเหมาะสมต่อการเติมฟองโฟม^[47]) พิจารณาจากองค์ประกอบทางเคมีของปูนปลาสเตอร์และสารละลายโซเดียมซิลิเกตในตารางที่ 3.3 และศึกษาความสามารถในการเติมฟองโฟมปริมาตร 1 ลิตร (สารก่อโฟมต่อน้ำ ร้อยละ 10:100 โดยน้ำหนัก) ที่ส่งผลต่อการเกิดเป็นเนื้อดินแบบโคลนอ่อน (Soft mud) สามารถขึ้นรูปด้วยมือและคงรูปของชิ้นงานหลังขึ้นรูปได้ ประกอบกับเพื่อควบคุมความเหนียวของเนื้อดินในแต่ละสูตรให้มีความเหนียวใกล้เคียงกันจึงมีการเติมน้ำเพิ่มเติมแล้วทดสอบความเหนียวด้วยเครื่อง Pfeifferkorn plasticity test

ตารางที่ 3.3 องค์ประกอบทางเคมีของปูนปลาสเตอร์กับสารละลายโซเดียมซิลิเกต

วัตถุดิบ	องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละโดยน้ำหนัก)				
	CaO	SO ₃	Na ₂ O	SiO ₂	H ₂ O
ปูนปลาสเตอร์	32.60	46.50	0.00	0.00	20.90
โซเดียมซิลิเกต	0.00	0.00	10.10	31.12	58.78

ในงานวิจัยได้ออกแบบสูตรส่วนผสมออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มที่ 1 สูตรอิฐดินเผา สูตรอิฐมวลเบากลุ่มที่ 2 และสูตรอิฐมวลเบากลุ่มที่ 3 ดังแสดงในตารางที่ 3.4-3.6 ตามลำดับ ดังนี้

- 1) สูตรส่วนผสมกลุ่มที่ 1 อิฐดินเผา เป็นสูตรที่ประกอบด้วย ดินราชบุรี ร้อยละ 100 โดยได้คำนวณหาร้อยละของน้ำที่เหมาะสมต่อการขึ้นรูปโดยไม่เติมแกลบ สูตรอิฐดินเผามีส่วนผสมของวัตถุดิบแสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 สูตรอิฐดินเผา

สูตร	วัตถุดิบ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)				
	ดินราชบุรี	ปูนปลาสเตอร์	โซเดียมซิลิเกต	สารก่อโฟม	น้ำ ^[ก]
อิฐดินเผา	100	0	0	0	43.33

หมายเหตุ [ก] เป็นน้ำที่ใช้หมักดินราชบุรี โดยคำนวณจากร้อยละโดยน้ำหนักของดินราชบุรี

- 2) สูตรอิฐมวลเบากลุ่มที่ 2 เป็นสูตรที่ประกอบด้วย ดินราชบุรี ปูนปลาสเตอร์และสารละลายโซเดียมซิลิเกต แสดงในชื่อสูตร RP1-RP4 และสูตรที่ประกอบด้วย ดินราชบุรี

ปูนปลาสเตอร์ สารละลายโซเดียมซิลิเกต และสารก่อโฟม แสดงในชื่อสูตร RP5F-RP8F ดังตารางที่ 3.4 เพื่อศึกษาความสามารถในการเติมปูนปลาสเตอร์ตั้งแต่ ร้อยละ 5 10 25 และ 50 โดยน้ำหนัก ให้ทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมซิลิเกตในอัตราส่วน 1:1 ในระบบน้ำดินและฟองโฟม อีกทั้งศึกษาการเติมน้ำเพิ่มเติมเพื่อให้เนื้อดินมีความเหนียวที่ใกล้เคียงกัน และมีลักษณะเป็นแบบโคลนอ่อนที่เหมาะสมต่อการขึ้นรูป และนำไปพัฒนาหรือปรับปรุงในสูตรอิฐมวลเบากลุ่มที่ 3 ที่มีการเติมเถ้าหนักลิแกนด์ สูตรอิฐมวลเบากลุ่มที่ 2 มีส่วนผสมของวัตถุดิบแสดงในตารางที่ 3.5

3) สูตรอิฐมวลเบากลุ่มที่ 3 เป็นสูตรที่ประกอบด้วย ดินราชบุรี เถ้าหนักลิแกนด์ แสดงในชื่อสูตร RL9 สูตรที่ประกอบด้วย ดินราชบุรี เถ้าหนักลิแกนด์ ปูนปลาสเตอร์ (กำหนดให้คงที่ ร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก) และโซเดียมซิลิเกต แสดงในชื่อสูตร RL10-RL11 เพื่อศึกษาความสามารถในการเติมเถ้าหนักลิแกนด์ตั้งแต่ ร้อยละ 25 และ 50 โดยน้ำหนัก สูตรที่ประกอบด้วย ดินราชบุรี เถ้าหนักลิแกนด์ ปูนปลาสเตอร์ (กำหนดให้คงที่ ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก) และโซเดียมซิลิเกต แสดงในชื่อสูตร RL12-RL14 และสูตรที่ประกอบด้วย ดินราชบุรี เถ้าหนักลิแกนด์ ปูนปลาสเตอร์ (กำหนดให้คงที่ ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก) โซเดียมซิลิเกต และสารก่อโฟม แสดงในชื่อสูตร RL15F-RL17F เพื่อศึกษาความสามารถในการเติมเถ้าหนักลิแกนด์ตั้งแต่ ร้อยละ 20 40 และ 60 โดยน้ำหนัก แทนที่ดินราชบุรี อีกทั้งศึกษาการเติมน้ำเพิ่มเติมเพื่อให้เนื้อดินมีความเหนียวที่ใกล้เคียงกันและมีลักษณะเป็นแบบโคลนอ่อน สูตรอิฐมวลเบากลุ่มที่ 3 มีส่วนผสมของวัตถุดิบแสดงในตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.5 สูตรอิฐมวลเบากลุ่มที่ 2

วัตถุดิบ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	สูตร							
	RP1	RP2	RP3	RP4	RP5F	RP6F	RP7F	RP8F
ดินราชบุรี	100	100	100	100	100	100	100	100
เถ้าหนักลิแกนด์	0	0	0	0	0	0	0	0
รวม	100	100	100	100	100	100	100	100
ปูนปลาสเตอร์	5	10	25	50	5	10	25	50
โซเดียมซิลิเกต ^[ก]	5	10	25	50	5	10	25	50
สารก่อโฟม ^[ข]	0	0	0	0	1	1	1	1
น้ำ ^[ค]	80	80	80	80	80	80	80	80
น้ำเติมเพิ่ม ^[ง]	0	0	5	10	0	0	0	0

ตารางที่ 3.6 สูตรอิฐมวลเบากลุ่มที่ 3

วัตถุดิบ (ร้อยละโดย น้ำหนัก)	สูตร								
	RL9	RL10	RL11	RL12	RL13	RL14	RL15F	RL16F	RL17F
ดินราชบุรี	66.67	75	50	80	60	40	80	60	40
เถ้าหนักลิกไนต์	33.33	25	50	20	40	60	20	40	60
รวม	100	100	100	100	100	100	100	100	100
ปูนปลาสเตอร์	0	50	50	20	20	20	20	20	20
โซเดียมซิลิเกต ^[ก]	0	50	50	20	20	20	20	20	20
สารก่อโฟม ^[ข]	0	0	0	0	0	0	0.8	0.8	0.8
น้ำ ^[ค]	53.33	80	80	64	64	64	64	64	64
น้ำเติมเพิ่ม ^[ง]	6.67	30	40	40	24	32	8	0	0

หมายเหตุ [ก] โซเดียมซิลิเกต ที่ใช้เป็นส่วนประกอบในสูตรอิฐมวลเบาเป็นสารละลายโซเดียมซิลิเกตที่มืองค์ประกอบของน้ำในโครงสร้าง ร้อยละ 58.78 โดยน้ำหนัก น้ำในโครงสร้างของโซเดียมซิลิเกตจะถูกคำนวณรวมกับปริมาตรของน้ำทั้งหมดที่ใช้ในแต่ละสูตรแสดงในตารางที่ 4.3

[ข] สารก่อโฟม ใช้เป็นสารที่ทำให้เกิดฟองโฟม จากการปั่นสารก่อโฟมกับน้ำด้วยอัตราส่วน 20:200 กรัม โดยเตรียมฟองโฟมในปริมาตร 2 ลิตร ซึ่งแต่ละสูตรจะเติมในปริมาตร 1 ลิตร น้ำในฟองโฟมจะถูกคำนวณรวมกับปริมาตรของน้ำทั้งหมดที่ใช้ในแต่ละสูตรแสดงในตารางที่ 4.3

[ค] น้ำที่ใช้หมักกับดินราชบุรี โดยน้ำที่ใช้คำนวณจากร้อยละโดยน้ำหนักรวมของดินราชบุรีและเถ้าหนักลิกไนต์ และจะถูกคำนวณรวมกับปริมาตรของน้ำทั้งหมดที่ใช้ในแต่ละสูตร แสดงในตารางที่ 4.3

[ง] น้ำเติมเพิ่ม เป็นน้ำที่เติมเข้าไปเพื่อให้เนื้อดินมีความเหนียวที่ใกล้เคียงกัน มีลักษณะเป็นแบบโคลนอ่อน โดยทดสอบด้วย Pfefferkorn plasticity test ซึ่งน้ำเติมเพิ่มคำนวณจากร้อยละโดยน้ำหนักรวมของดินราชบุรีและเถ้าหนักลิกไนต์ และจะถูกคำนวณรวมกับปริมาตรของน้ำทั้งหมดที่ใช้ในแต่ละสูตรแสดงในตารางที่ 4.3

3.4 การขึ้นรูปชิ้นงาน การอบแห้งและการเผาชิ้นงาน

การขึ้นรูป การอบแห้งและการเผาชิ้นงานของสูตรอิฐดินเผา สูตรอิฐมวลเบากลุ่มที่ 2 และสูตรอิฐมวลเบากลุ่มที่ 3 มีขั้นตอนดังนี้

3.4.1 สูตรอิฐดินเผา

1) หมักดินราชบุรีและน้ำตามอัตราส่วนของสูตรอิฐดินเผา ที่แสดงในตารางที่ 3.4 เป็นเวลา 1 วัน

2) ปั่นน้ำดินที่หมักด้วยเครื่องปั่นผสมวัตถุดิบ แสดงดังภาพที่ 3.2 (ก) โดยใช้ใบพัดแบบตะกร้อ ปั่นด้วยความเร็วรอบในระดับ 3 เป็นเวลา 5 นาที

3.4.2 สูตรอิฐมวลเบากลุ่มที่ 2

1) หมักดินราชบุรีและน้ำตามอัตราส่วนของสูตรอิฐมวลเบากลุ่มที่ 2 ที่แสดงในตารางที่ 3.4 เป็นเวลา 1 วัน

2) ปั่นน้ำดินที่หมักด้วยเครื่องปั่นผสมวัตถุดิบ แสดงดังภาพที่ 3.2 (ก) โดยใช้ใบพัดแบบตะกร้อ ปั่นด้วยความเร็วรอบในระดับ 3 เป็นเวลา 5 นาที

3) เติมนูนพลาสติกที่กำหนดในแต่ละสูตร ปั่นผสมกับน้ำดินเป็นเวลา 5 นาที

4) สูตรอิฐมวลเบา RP5F-RP8F ที่มีการเติมฟองโฟม โดยฟองโฟมเตรียมจากอัตราส่วนของสารก่อโฟมต่อน้ำ 20:200 กรัม ปั่นด้วยเครื่องปั่นฟองโฟม ดังภาพที่ 3.2 (ข) ด้วยความเร็วรอบ 1500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 นาที เติมนูนพลาสติกในปริมาตร 1 ลิตรต่อสูตร ปั่นผสมกับน้ำดินเป็นเวลา 2 นาที (สารก่อโฟมต่อน้ำในอัตราส่วน 20:200 กรัม ปริมาตรของฟองโฟมที่เตรียมได้ประมาณ 2 ลิตร)

5) เติมนูนซิลิเกต ปั่นผสมกับน้ำดินด้วยความเร็วรอบในระดับ 5 เป็นเวลา 5 นาที

6) เติมน้ำที่ต้องเติมเพิ่มในแต่ละสูตรเพื่อให้ได้เนื้อดินที่มีความเหนียวใกล้เคียงกัน ปั่นผสมกับน้ำดินด้วยความเร็วรอบในระดับ 5 เป็นเวลา 2 นาที

3.4.3 สูตรอิฐมวลเบากลุ่มที่ 3

1) หมักดินราชบุรีและน้ำตามอัตราส่วนของสูตรอิฐมวลเบากลุ่มที่ 3 ที่แสดงในตารางที่ 3.5 เป็นเวลา 1 วัน

2) ปั่นน้ำดินที่หมักด้วยเครื่องปั่นผสมวัตถุดิบ แสดงดังภาพที่ 3.2 (ก) โดยใช้ใบพัดแบบตะกร้อ ปั่นด้วยความเร็วรอบในระดับ 3 เป็นเวลา 5 นาที

3) เติมนูนหลักไนต์และนูนพลาสติกที่กำหนดในแต่ละสูตร ปั่นผสมกับน้ำดินเป็นเวลา 5 นาที

4) สูตรอิฐมวลเบา RP15F-RP17F ที่มีการเติมฟองโฟม โดยฟองโฟมถูกเตรียมขึ้นด้วยวิธีเดียวกันกับ ข้อ 4) ของสูตรอิฐมวลเบากลุ่มที่ 2 ปั่นผสมกับน้ำดินเป็นเวลา 2 นาที

5) เติมโซเดียมซัลเฟต ปั่นผสมกับน้ำดินด้วยความเร็วรอบในระดับ 5 เป็นเวลา 5 นาที

6) เติมน้ำที่ต้องเติมเพิ่มในแต่ละสูตรเพื่อให้ได้เนื้อดินที่มีความเหนียวใกล้เคียงกัน ปั่นผสมกับน้ำดินด้วยความเร็วรอบในระดับ 5 เป็นเวลา 2 นาที

3.4.4 ขึ้นรูปชิ้นงาน โดยขึ้นรูปชิ้นงานด้วยมือ มีขนาดความกว้าง ความยาว และความสูง ด้านละ 50 มิลลิเมตร ในแบบพิมพ์อะคริลิก ดังภาพที่ 3.2 (ค)

3.4.5 อบแห้งชิ้นงาน นำชิ้นงานในแต่ละสูตรไปอบแห้งที่อุณหภูมิต่างกัน 3 ระดับ เป็นเวลา 7 วัน โดยมีตารางการอบแห้งที่ 3 อุณหภูมิ ได้แก่ 40 65 และ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 2 และ 2 วัน ตามลำดับ ตกแต่งชิ้นงาน

3.4.6 เผาชิ้นงาน โดยอุณหภูมิที่ใช้เผาชิ้นงาน ได้แก่ 800 900 และ 1000 องศาเซลเซียส มีอัตราการให้ความร้อนเท่ากับ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที และมีระยะเวลาขึ้นไฟ 30 นาที

3.5 การทดสอบสมบัติทางกายภาพของชิ้นงาน

ชิ้นงานอิฐดินเผาและอิฐมวลเบาในแต่ละสูตรมีการทดสอบสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ การหดตัวหลังอบแห้งและหลังเผา การดูดซึมน้ำ ความหนาแน่น และความต้านทานแรงอัด โดยการทดสอบสมบัติทางกายภาพของอิฐดินเผาอ้างอิงตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมอิฐก่อสร้างสามัญ มอก. 77-2545^[8] และการทดสอบสมบัติของอิฐมวลเบากลุ่มที่ 2 และ 3 อ้างอิงตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ มอก.2601-2556^[3] ประกอบกับการทดสอบความเหนียวของเนื้อดินในแต่ละสูตร มีการทดสอบดังนี้

3.5.1 การหดตัวหลังอบแห้งและหลังเผา โดยวัดการหดตัวของชิ้นงานแบบการหดตัวเชิงเส้น โดยใช้เวอร์เนียคาร์ลิปเปอร์ ความละเอียด 0.01 มิลลิเมตร มีรายละเอียดการทดสอบดังนี้

- 1) วัดขนาดของแบบพิมพ์ขึ้นรูปชิ้นงาน (l_0) ในหน่วยเป็นมิลลิเมตร
- 2) วัดขนาดความยาวของชิ้นงานหลังอบแห้ง (l_1) ในหน่วยเป็นมิลลิเมตร
- 3) วัดขนาดความยาวของชิ้นงานหลังเผา (l_2) ในหน่วยเป็นมิลลิเมตร
- 4) แทนค่าในสมการที่ 3.1 เพื่อหาร้อยละของการหดตัวหลังอบแห้งของชิ้นงาน

(S_{drying})

$$S_{drying} = \frac{l_0 - l_1}{l_0} \times 100 \quad (3.1)$$

- 5) แทนค่าในสมการที่ 3.2 เพื่อหาร้อยละของการหดตัวหลังเผาของชิ้นงาน

(S_{firing})

$$S_{firing} = \frac{l_1 - l_2}{l_1} \times 100 \quad (3.2)$$

3.5.2 การดูดซึมน้ำ ชิ้นงานหลังเผามีการทดสอบการดูดซึมน้ำโดยใช้ชุดทดสอบอาร์คิมิดีส มีรายละเอียดการทดสอบดังนี้

- 1) แช่ชิ้นงานในน้ำกลั่นให้อิ่มตัว เป็นเวลา 5 ชั่วโมง โดยให้ระดับน้ำกลั่นอยู่เหนือชิ้นงาน
- 2) ชับน้ำบนผิวชิ้นงานด้วยผ้าชุมน้ำ นำชิ้นงานไปชั่งน้ำหนักในอากาศ (W_2) ในหน่วยเป็นกรัม
- 3) อบชิ้นงานหลังเผาในตู้อบอุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทิ้งไว้ให้เย็นแล้วนำไปชั่งน้ำหนักในอากาศ (W_1) ในหน่วยเป็นกรัม
- 4) แทนค่าในสมการที่ 3.3 เพื่อหาค่าร้อยละของการดูดซึมน้ำ (WA) ของชิ้นงาน

$$WA = \frac{W_2 - W_1}{W_1} \times 100 \quad (3.3)$$

3.5.3 ความหนาแน่น ชิ้นงานหลังเผามีการทดสอบความหนาแน่น โดยทดสอบความหนาแน่นรวมของชิ้นงานด้วยชุดทดสอบอาร์คิมิดีส มีรายละเอียดการทดสอบดังนี้

- 1) แช่ชิ้นงานในน้ำกลั่นให้อิ่มตัว เป็นเวลา 5 ชั่วโมง โดยให้ระดับน้ำกลั่นอยู่เหนือชิ้นงาน
- 2) นำชิ้นงานไปชั่งน้ำหนักในน้ำ (W_1) ในหน่วยเป็นกรัม
- 3) ชับน้ำบนผิวชิ้นงานด้วยผ้าชุมน้ำ นำชิ้นงานไปชั่งน้ำหนักในอากาศ (W_2) ในหน่วยเป็นกรัม
- 4) วัดอุณหภูมิของน้ำกลั่นของการทดสอบเพื่อหาความหนาแน่นของน้ำ (d_{water}) ในหน่วยเป็นกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ณ อุณหภูมินั้น ในงานวิจัยได้กำหนดให้อุณหภูมิของน้ำกลั่นขณะทำการทดสอบ เท่ากับ 25 องศาเซลเซียส น้ำมีความหนาแน่นเท่ากับ 0.997044 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
- 5) แทนค่าในสมการที่ 3.4 เพื่อหาปริมาตรของชิ้นงาน (V) ในหน่วยเป็นลูกบาศก์เซนติเมตร

$$V = \frac{W_2 - W_1}{d_{water}} \quad (3.4)$$

- 6) นำชิ้นงานไปอบแห้งในตู้อบอุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทิ้งไว้ให้เย็น แล้วนำไปชั่งน้ำหนักในอากาศ (m) ในหน่วยเป็นกรัม

7) แทนค่าในสมการที่ 3.5 เพื่อหาความหนาแน่นของชิ้นงาน (d) ในหน่วยเป็นกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

$$d = \frac{m}{v} \quad (3.5)$$

3.5.4 ความต้านทานแรงอัด ชิ้นงานหลังเผามีการทดสอบความต้านทานแรงอัดด้วยเครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (Universal testing machine) ผลิตโดยบริษัท Instron Testing Machine รุ่น 5843 ดังภาพที่ 3.6 มีรายละเอียดการทดสอบดังนี้

- 1) วัดขนาดความกว้าง (l_1) และความยาว (l_2) ของชิ้นงานในหน่วยเป็นมิลลิเมตร
- 2) แทนค่าในสมการที่ 3.6 เพื่อหาพื้นที่รับแรงกด (A) ในหน่วยเป็นตารางมิลลิเมตร

$$A = l_1 \times l_2 \quad (3.6)$$

3) ทำการทดสอบชิ้นงานโดยให้แรงกดจากเครื่อง บันทึกค่าแรงสูงสุดที่รับได้ของชิ้นงาน (F) ในหน่วยเป็นนิวตัน

4) แทนค่าในสมการที่ 3.7 เพื่อหาความต้านทานแรงอัดของชิ้นงาน (C) ในหน่วยเป็นเมกะพาสคัล

$$C = \frac{F}{A} \quad (3.7)$$



ภาพที่ 3.6 เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (Universal test machine)

3.5.5 ความเหนียวของเนื้อดิน^[2, 16] ซึ่งแสดงผลจากการหาค่าสัมประสิทธิ์ความเหนียวของเนื้อดิน โดยการทดสอบหาความต่างของความสูงของชิ้นงานก่อนทดสอบและหลังทดสอบในแต่ละ

สูตร โดยใช้เครื่อง Pfefferkorn plasticity test และอุปกรณ์สำหรับเตรียมชั้นงานทดสอบดังภาพที่ 3.7 มีรายละเอียดการทดสอบดังนี้

- 1) ชั้นรูปชั้นงานเป็นทรงกระบอกด้วยอุปกรณ์สำหรับเตรียมชั้นงานทดสอบ ซึ่งชั้นงานมีความสูงเท่ากับ 40 มิลลิเมตร (h_0)
- 2) นำไปทดสอบด้วยเครื่อง Pfefferkorn plasticity test เพื่อทดสอบความเหนียวของเนื้อดินปั้น โดยยกแผ่นสำหรับตีชั้นงานขึ้นสูงสุด แล้วปล่อยให้กระทบกับชั้นงานตัวอย่าง
- 3) อ่านค่าจากสเกลบนเครื่องมือแล้ววัดความสูงที่ได้ (h) ในหน่วยเป็นมิลลิเมตร
- 4) แทนค่าในสมการที่ 3.8 เพื่อหาสัมประสิทธิ์ความเหนียวของเนื้อดินปั้น (a)

$$a = \frac{h_0}{h} \quad (3.8)$$



ภาพที่ 3.7 เครื่อง Pfefferkorn plasticity test และอุปกรณ์สำหรับเตรียมชั้นงานทดสอบ

3.6 การวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของชั้นงาน

ชั้นงานอิฐดินเผาและอิฐมวลเบา กลุ่มที่ 2 และ 3 ในแต่ละสูตรมีการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติ ได้แก่ สีของชั้นงาน การนำความร้อนของชั้นงาน องค์ประกอบเฟส และโครงสร้างจุลภาค มีการวิเคราะห์ดังนี้

3.6.1 สีของชั้นงานหลังเผา โดยวิเคราะห์ค่าสีของชั้นงานหลังเผาด้วยเทคนิค CIE $L^* a^* b^*$ โดยใช้เครื่องโครมามิเตอร์ (Chroma meter) ยี่ห้อ Konica Minolta รุ่น CR-400 ดังภาพที่ 3.8 วิเคราะห์แล้วพล็อตกราฟเพื่อเปรียบเทียบสีของชั้นงานอิฐดินเผาและอิฐมวลเบา



ภาพที่ 3.8 เครื่องโครมามิเตอร์ (Chroma meter)

3.6.2 การนำความร้อน โดยวิเคราะห์การนำความร้อนด้วยเทคนิคฮอตดิสก์ (Hot-disk method) ของชิ้นงาน ผลิตโดยบริษัท LISSIE รุ่น THB-1 ดังภาพที่ 3.9 เพื่อใช้แสดงสมบัติความเป็นฉนวนกันความร้อนของชิ้นงานอิฐมวลเบาเปรียบเทียบกับอิฐดินเผา มีวิธีการทดสอบดังนี้

- 1) ชิ้นรูปชิ้นงานขนาดความกว้างและความยาว 50 มิลลิเมตร และความหนา 10 มิลลิเมตร และเผาชิ้นงานที่อุณหภูมิต่าง ๆ
- 2) นำชิ้นงานไปวิเคราะห์การนำความร้อนโดยให้ชิ้นงานทั้งสองชิ้นประกบกันอยู่ในตัวยึดชิ้นงาน และมีโพรบ (Probe) คั่นอยู่ระหว่างชิ้นงานทั้งสอง
- 3) บันทึกข้อมูลที่อ่านได้ ได้แก่ อุณหภูมิการวิเคราะห์ ในหน่วยองศาเซลเซียส และการนำความร้อน (Thermal conductivity) ในหน่วยวัตต์ต่อเมตรเคลวิน
- 4) วิเคราะห์แล้วพล็อตกราฟเพื่อเปรียบเทียบการนำความร้อนของชิ้นงานอิฐดินเผาและอิฐมวลเบา



ภาพที่ 3.9 เครื่องวิเคราะห์การนำความร้อนด้วยเทคนิคฮอตดิสก์ (Hot-disk method)

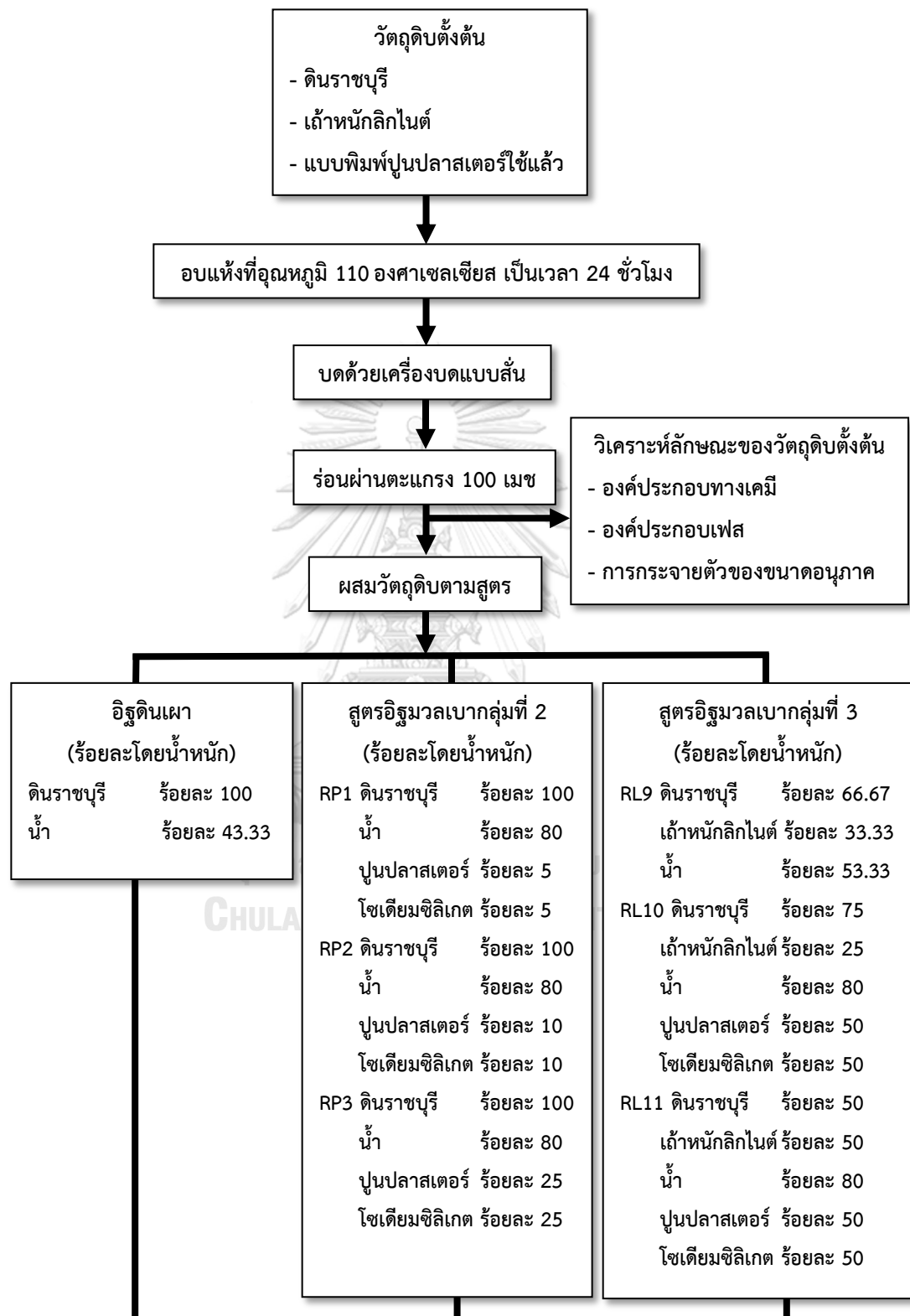
3.6.3 องค์ประกอบเฟส การวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction) ของอิฐมวลเบาในแต่ละสูตร ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (X-ray diffractometer) ผลิตโดยบริษัท Bruker รุ่น D8 Advanced ดังภาพที่ 3.3 โดยใช้ $\text{Cu-K}\alpha$ radiation ช่วง 2θ เท่ากับ 10-80 องศา โดยเตรียมตัวอย่างเป็นผง บดละเอียดด้วยโกร่งจากนั้นร่อนผ่านตะแกรงคัดขนาด 200 เมช และนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส ก่อนนำไปวิเคราะห์

3.6.4 โครงสร้างจุลภาค วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ผลิตโดยบริษัท JEOL รุ่น JSM-6480 LV ดังภาพที่ 3.10 โดยเตรียมตัวอย่างขนาดเล็กกว่า 2 มิลลิเมตร อบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส จากนั้นนำไปติดเทปคาร์บอนและเคลือบด้วยทอง แล้วนำไปวิเคราะห์ดูพื้นผิวและภายในตัวอย่างที่กำลังขยาย 200X 500X และ 2000X

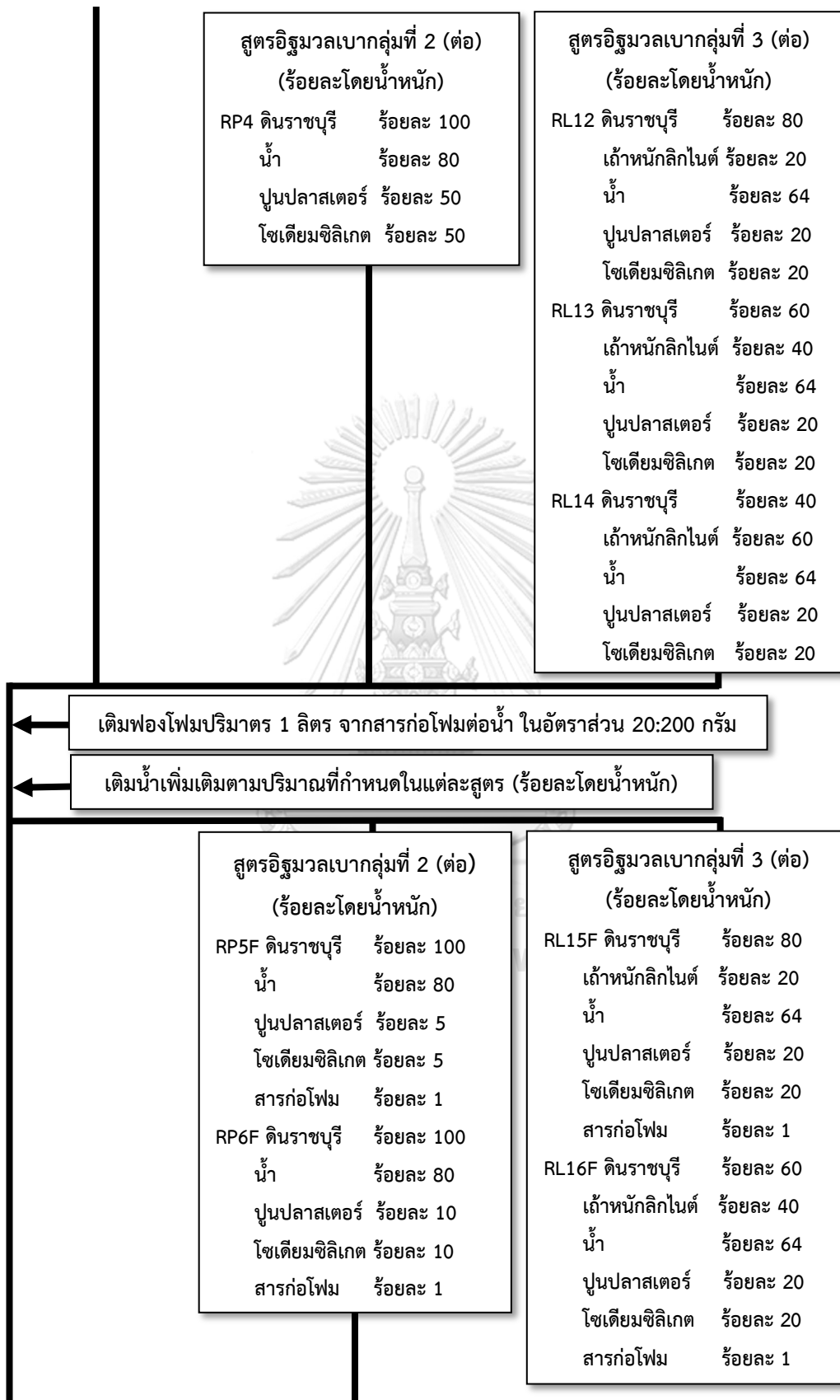


ภาพที่ 3.10 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

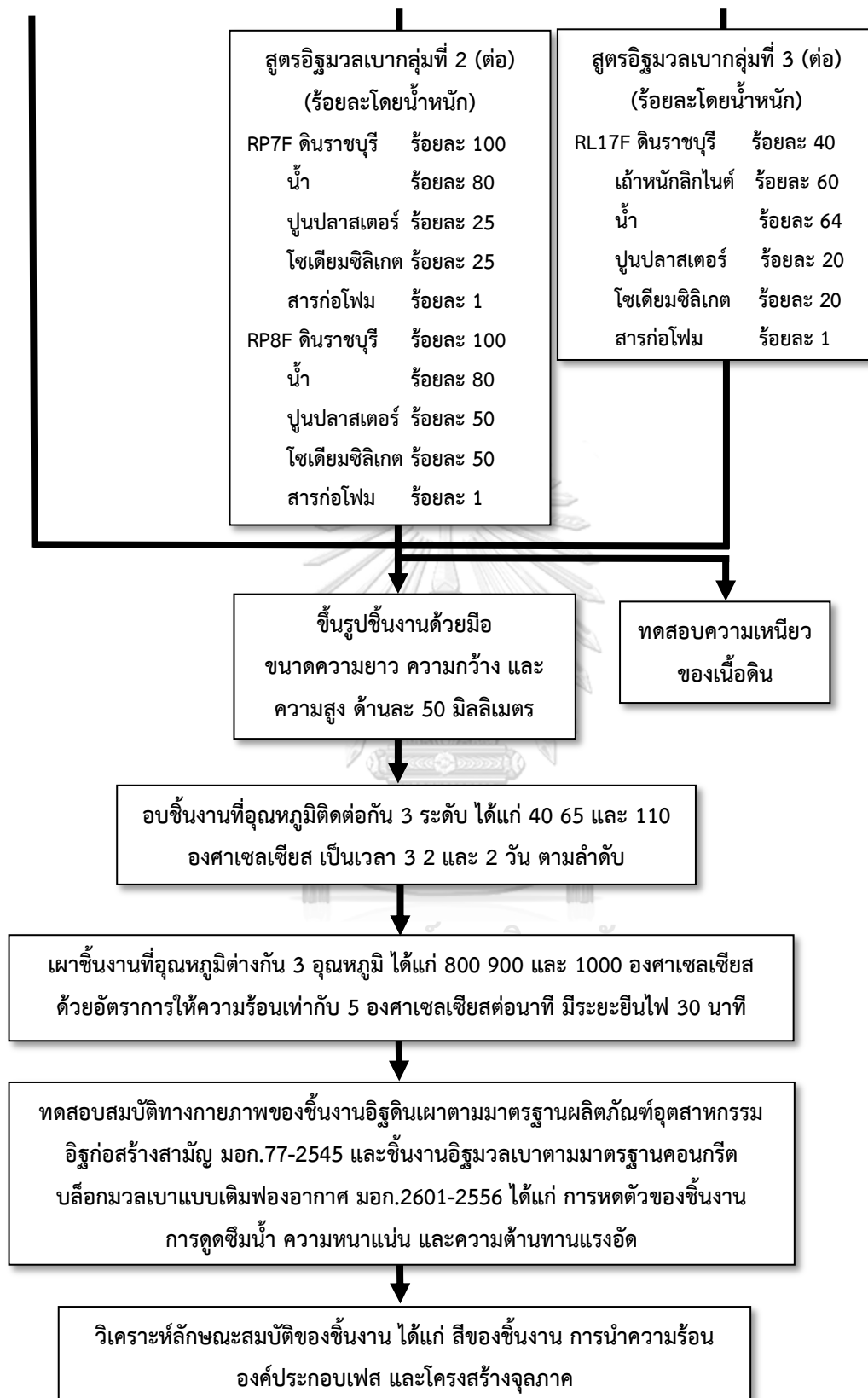
3.7 แผนผังการดำเนินการวิจัย



ภาพที่ 3.11 แผนผังการดำเนินการวิจัย



ภาพที่ 3.11 แผนผังการดำเนินการวิจัย (ต่อ)



ภาพที่ 3.11 แผนผังการดำเนินการวิจัย (ต่อ)

บทที่ 4

ผลการดำเนินการวิจัย

4.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี

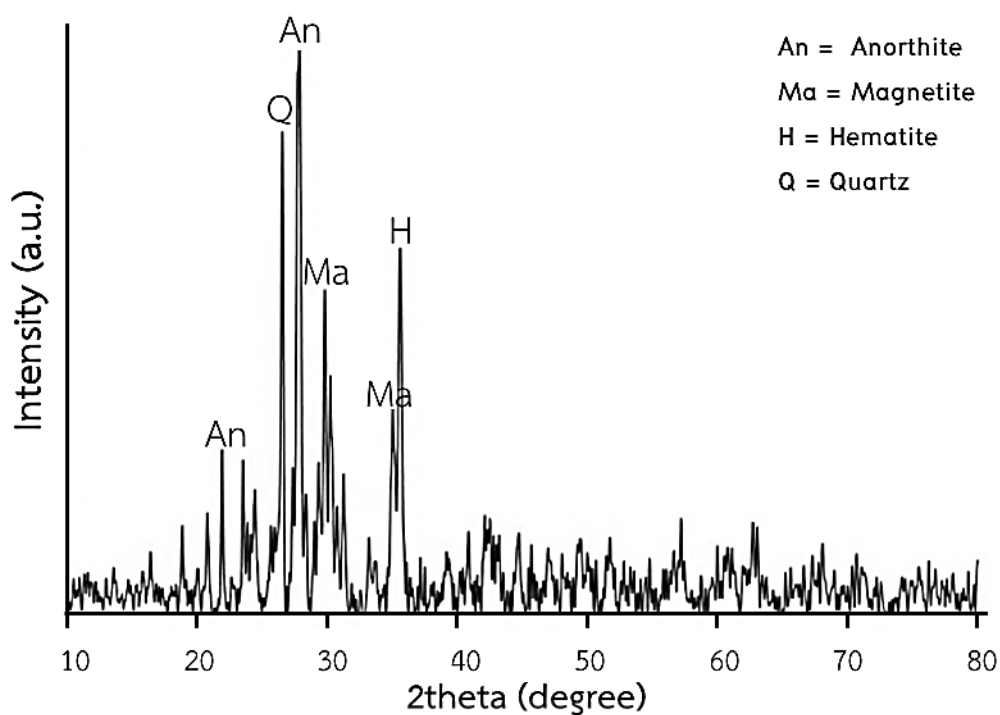
จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบตั้งต้น ได้แก่ ดินราชบุรี เถ้าหนักลิกไนต์ และแบบพิมพ์ปูนปลาสเตอร์ใช้แล้ว ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์ (X-ray fluorescence) ดังแสดงในตารางที่ 4.1 พบว่าเถ้าหนักลิกไนต์ประกอบด้วย ซิลิกา (SiO_2) ร้อยละ 37.90 อะลูมินา (Al_2O_3) ร้อยละ 19.73 และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) ร้อยละ 14.53 ซึ่งมีความคล้ายคลึงกับองค์ประกอบหลักทางเคมีที่พบในดินราชบุรี อีกทั้งเถ้าหนักลิกไนต์มีองค์ประกอบทางเคมีของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ร้อยละ 18.72 และซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) ร้อยละ 2.72 เถ้าหนักลิกไนต์ยังพบองค์ประกอบทางเคมีอย่างอื่นประกอบด้วย โพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O) ร้อยละ 2.50 แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ร้อยละ 1.76 และโซเดียมออกไซด์ (Na_2O) ร้อยละ 0.70 และแบบพิมพ์ปูนปลาสเตอร์ใช้แล้วมีองค์ประกอบของแคลเซียมออกไซด์ ร้อยละ 41.45 หากเปรียบเทียบสัดส่วนขององค์ประกอบทางเคมีของเถ้าหนักลิกไนต์กับดินราชบุรี พบว่าสัดส่วนของอะลูมินามีสัดส่วนที่ใกล้เคียงกัน แต่สัดส่วนของซิลิกาในเถ้าหนักลิกไนต์จะมีน้อยกว่าในดินราชบุรีที่มีอยู่ ร้อยละ 58.60 แต่เฟอร์ริกออกไซด์ในเถ้าหนักลิกไนต์ที่มีมากนั้นจะช่วยให้ชิ้นงานอิฐมวลเบาที่มีสีแดงที่เข้มขึ้น เมื่อพิจารณาถึงองค์ประกอบทางเคมีข้างต้นของเถ้าหนักลิกไนต์จะเห็นได้ว่า เถ้าหนักลิกไนต์สามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นทดแทนบางส่วนของดินราชบุรี และเหมาะสมใช้ควบคู่กับแบบพิมพ์ปูนปลาสเตอร์ใช้แล้ว

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของดินราชบุรี เถ้าหนักลิกไนต์และแบบพิมพ์ปูนปลาสเตอร์ใช้แล้ว

วัตถุดิบ	องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละโดยน้ำหนัก)									
	SiO_2	Al_2O_3	CaO	Fe_2O_3	SO_3	K_2O	MgO	Na_2O	Other	LOI
ดินราชบุรี	58.60	20.90	0.54	3.93	0.70	1.10	0.58	0.22	0.81	12.99
ปูนปลาสเตอร์	0.21	0.11	41.45	0.05	58.12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06
เถ้าหนัก ลิกไนต์	37.90	19.73	18.72	14.53	2.72	2.50	1.76	0.70	0.61	0.67

4.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเฟส

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสของเก้าหนักลิกไนต์ ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction) ดังแสดงในภาพที่ 4.1 พบว่าเฟสของเก้าหนักลิกไนต์ประกอบด้วย อะนอร์ไทต์ ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) ควอตซ์ (SiO_2) แมกนีไทต์ (Fe_3O_4) และฮีมาไทต์ (Fe_2O_3) ซึ่งมีความสอดคล้องกับองค์ประกอบทางเคมีที่ได้จากการวิเคราะห์ในตารางที่ 4.1 โดยเฟสอะนอร์ไทต์ประกอบด้วย แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) โดยมีซิลิกาที่อยู่ในรูปของเฟสควอตซ์ และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) จะอยู่ในรูปของฮีมาไทต์และแมกนีไทต์ โดยฮีมาไทต์ทำให้ชิ้นงานหลังเผามีสีแดงเข้มขึ้น และแมกนีไทต์ทำให้ชิ้นงานหลังเผามีสีคล้ำขึ้น^[25, 48]



ภาพที่ 4.1 องค์ประกอบเฟสของเก้าหนักลิกไนต์

4.3 ผลการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของวัตถุดิบตั้งต้น

จากผลการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของวัตถุดิบทั้งหมด ได้แก่ ดินราชบุรี เก้าหนักลิกไนต์ และแบบพิมพ์ปูนปลาสเตอร์ใช้แล้ว พบว่าดินราชบุรีมีขนาดอนุภาคเล็กที่สุด มีขนาดอนุภาคที่ตำแหน่ง d_{50} ประมาณ 7.992 ไมโครเมตร รองลงมาเป็นแบบพิมพ์ปูนปลาสเตอร์ใช้แล้ว และเก้าหนักลิกไนต์ ซึ่งมีขนาดอนุภาคที่ตำแหน่ง d_{50} ประมาณ 16.311 และ 37.673 ไมโครเมตร ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.2 เห็นได้ว่าอนุภาคของดินราชบุรีมีขนาดเล็กที่สุด แต่ในขณะที่อนุภาคของเก้าหนักลิกไนต์

และปูนปลาสเตอร์จากแบบพิมพ์ปลาสเตอร์ใช้แล้วมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่กว่าดินราชบุรีประมาณ 4.7 และ 2.0 เท่า ตามลำดับ ดังนั้นในการผลิตอิฐมวลเบาจะต้องทำการบดวัตถุดิบตั้งต้นเพื่อให้ได้ขนาดอนุภาคที่ใกล้เคียงกับดินราชบุรี ให้เหมาะสมต่อการเติมฟองโฟม และมีสมบัติหลังเผาที่ดีขึ้น

ตารางที่ 4.2 การกระจายขนาดอนุภาคที่ตำแหน่ง d50 ของวัตถุดิบ ได้แก่ ดินราชบุรี เถ้าหนักลิกไนต์ และปูนปลาสเตอร์

วัตถุดิบ	ขนาดอนุภาคที่ตำแหน่ง d50 (ไมโครเมตร)
ดินราชบุรี	7.992
เถ้าหนักลิกไนต์	37.673
ปูนปลาสเตอร์	16.311

4.4 การทดสอบความเหนียวของเนื้อดิน

จากการทดสอบความเหนียวของเนื้อดินของสูตรอิฐดินเผาและอิฐมวลเบา โดยเริ่มต้นจากการเตรียมน้ำดินด้วยดินราชบุรีต่อน้ำ ร้อยละ 100:80 โดยน้ำหนัก มีการเติมเถ้าหนักลิกไนต์แทนที่ดินราชบุรีบางส่วน ซึ่งเถ้าหนักลิกไนต์เป็นวัตถุดิบที่ลดความเหนียวของดินราชบุรี และมีการเติมปูนปลาสเตอร์กับสารละลายโซเดียมซิลิเกตในอัตราส่วน 1:1 (สารละลายโซเดียมซิลิเกตมีองค์ประกอบของน้ำ ร้อยละ 58.78 โดยน้ำหนัก) เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเกิดเป็นโครงสร้างเจลของแคลเซียมซิลิเกต (CaSiO_3) และโซเดียมซิลิเกต ดังสมการที่ 1.1 ซึ่งส่งผลต่อการไหลตัวของน้ำดินลดลงอย่างมีนัยสำคัญทำให้มีลักษณะของเนื้อดินเป็นแบบโคลนอ่อน ประกอบกับการเติมฟองโฟมที่เตรียมจากสารก่อโฟมต่อน้ำ ในอัตราส่วน 20:200 กรัม และการเติมน้ำเพิ่มเติมเพื่อให้เนื้อดินของทุกสูตรมีความเหนียวใกล้เคียงกัน โดยทดสอบด้วยเครื่อง Pfefferkorn plasticity test ความเหนียวของเนื้อดินมีการรายงานผลเป็นค่าสัมประสิทธิ์ความเหนียวของเนื้อดิน คำนวณจากสมการที่ 3.8 ดังแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 สัมประสิทธิ์ความเหนียวของเนื้อดินของสูตรอิฐดินเผา และอิฐมวลเบากลุ่มที่ 2 และ 3

สูตร	น้ำ (กรัม)				รวม	สัมประสิทธิ์ความเหนียว
	น้ำหมักดิน	น้ำในฟองโฟม	น้ำในโครงสร้างโซเดียมซิลิเกต	น้ำเติมเพิ่ม		
อิฐดินเผา	650	0	0.00	0	650.00	7.1
RP1	800	0	29.39	0	829.39	7.3
RP2	800	0	58.78	0	858.78	7.0
RP3	800	0	146.95	50	996.95	7.0
RP4	800	0	293.90	100	1193.90	7.0
RP5F	800	100	29.39	0	929.39	7.0
RP6F	800	100	58.78	0	958.78	7.0
RP7F	800	100	146.95	0	1046.95	7.1
RP8F	800	100	293.90	0	1193.90	7.1
RL9	800	0	0.00	100	900.00	7.3
RL10	800	0	293.90	300	1393.90	7.3
RL11	800	0	293.90	400	1493.90	7.3
RL12	800	0	146.95	500	1446.95	7.0
RL13	800	0	146.95	300	1246.95	7.1
RL14	800	0	146.95	400	1346.95	7.1
RL15F	800	100	146.95	100	1146.95	7.0
RL16F	800	100	146.95	0	1046.95	7.0
RL17F	800	100	146.95	0	1046.95	7.0
			ค่าเฉลี่ย			7.1
			พิสัย			0.3

จากตารางที่ 4.3 จากสูตรอิฐดินเผาและสูตรอิฐมวลเบากลุ่มที่ 2 และ 3 พบว่าในแต่ละสูตร มีสัดส่วนของน้ำที่ไม่เท่ากัน เนื่องจากสัดส่วนของวัตถุดิบตั้งต้น ได้แก่ ดินราชบุรี เถ้าหนักลิทไนต์ และปูนปลาสเตอร์ มีสัดส่วนต่างกัน ด้วยดินราชบุรีเป็นวัตถุดิบที่มีความเหนียว ในขณะที่เถ้าหนักลิทไนต์และปูนปลาสเตอร์เป็นวัตถุดิบที่ไม่มีความเหนียว เมื่อผสมวัตถุดิบในสัดส่วนที่แตกต่างกันตามสูตรที่กำหนดจะส่งผลให้ลักษณะของเนื้อดินนั้นมีความเหนียวต่างกัน ดังนั้นจะต้องเติมน้ำเพิ่มเข้าไปในบางสูตรในระบบน้ำดิน เพื่อปรับความเหนียวของเนื้อดินในแต่ละสูตรให้มีค่าใกล้เคียงกัน จากการศึกษา

พบว่า การปรับสัดส่วนของน้ำในแต่ละสูตรดังแสดงในตารางที่ 4.3 ส่งผลให้ความเหนียวของเนื้อดินทุกสูตรมีสัมประสิทธิ์ของความเหนียวเฉลี่ยเท่ากับ 7.1 ซึ่งสอดคล้องกับความเหนียวของเนื้อดินที่มีลักษณะเป็นเนื้อเพสต์ (Paste) หรือเนื้อดินแบบโคลนอ่อน (Soft mud)^[49] เหมาะต่อการใช้เป็น เนื้อดินสำหรับขึ้นรูปชิ้นงานด้วยมือ จะเห็นได้ว่าการปรับสัดส่วนน้ำในแต่ละสูตรที่มีสัดส่วนของวัตถุดิบต่างกัน ให้มีค่าสัมประสิทธิ์ความเหนียวที่เท่ากันหรือใกล้เคียงกันจะช่วยให้เนื้อดินมีความเหนียวที่เหมือนกัน

4.5 การหัดตัวหลังอบแห้งของชิ้นงานสูตรอิฐมวลเบากลุ่มที่ 2

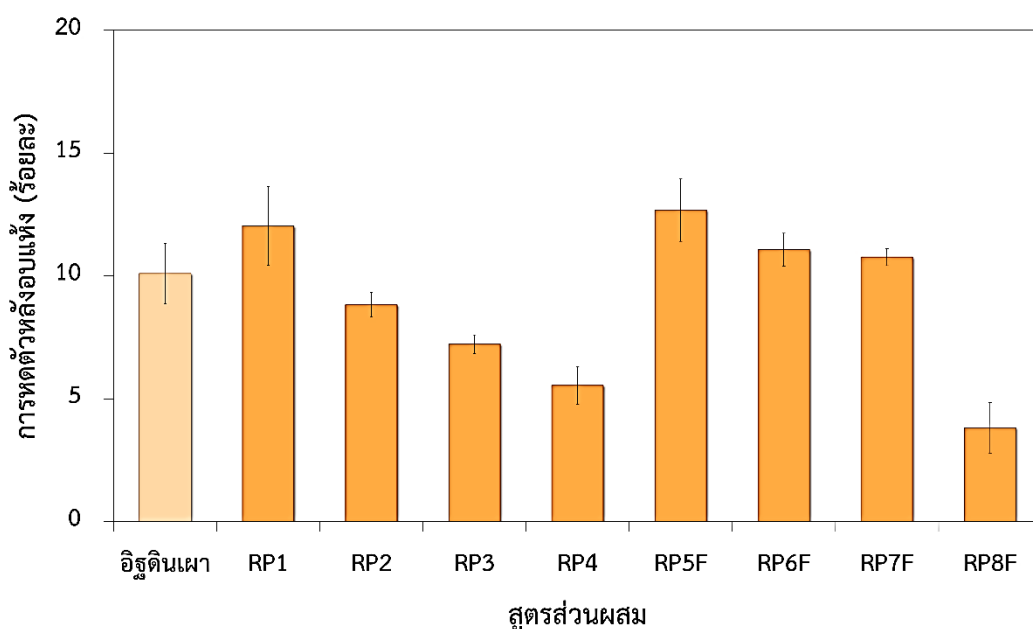
จากการทดสอบการหัดตัวหลังอบแห้งของชิ้นงานโดยคำนวณเป็นร้อยละของการหัดตัวเชิงเส้นจากสมการที่ 3.1 เมื่อพิจารณาการหัดตัวของชิ้นงานสูตรอิฐดินเผาและสูตรอิฐมวลเบากลุ่มที่ 2 เปรียบเทียบกัน ดังแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 การหัดตัวหลังอบแห้งของชิ้นงานสูตรอิฐมวลเบากลุ่มที่ 2 เปรียบเทียบกับสูตรอิฐดินเผา

สูตร	การหัดตัวหลังอบแห้ง (ร้อยละ)
อิฐดินเผา	10.10±1.23
RP1	12.03±1.59
RP2	8.82±0.50
RP3	7.22±0.38
RP4	5.54±0.76
RP5F	12.68±1.27
RP6F	11.07±0.66
RP7F	10.75±0.34
RP8F	3.81±1.03

จากตารางที่ 4.4 และภาพที่ 4.2 แสดงการหัดตัวหลังอบแห้งของสูตรอิฐมวลเบากลุ่มที่ 2 สูตร RP1-RP4 และการเติมฟองโฟมในสูตร RP5F-RP8F เปรียบเทียบกับสูตรอิฐดินเผา พบว่าชิ้นงานสูตรอิฐดินเผาที่มอดุ้ประกอบของดินราชบุรี ร้อยละ 100 โดยน้ำหนัก มีการหัดตัวหลังอบแห้งที่มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับสูตร RP2-RP4 ที่มีการเติมปูนปลาสเตอร์ตั้งแต่ ร้อยละ 10 25 และ 50 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ โดยสูตร RP2-RP4 มีแนวโน้มการหัดตัวหลังอบแห้งลดลงตามลำดับ เนื่องจากปูนปลาสเตอร์เป็นวัตถุดิบที่ไม่มีความเหนียว เมื่อเติมในปริมาณที่เพิ่มขึ้นผสมกับดินราชบุรีที่กำหนดให้คงที่ ส่งผลให้ความเหนียวของดินราชบุรีลดลง การหัดตัวหลังอบแห้งจึงลดลงตามไปด้วย

แต่จากการทดสอบการหดตัวหลังอบแห้งของสูตร RP1 ที่มีการเติมปูนปลาสเตอร์เพียง ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และมีการเติมน้ำในปริมาณที่มากกว่า แต่มีการหดตัวหลังอบแห้งใกล้เคียงกับสูตรอิฐดินเผา ในขณะที่สูตร RP3 และ RP4 ที่มีการเติมน้ำเพิ่ม ดังแสดงในตารางที่ 3.4 พบว่าการหดตัวหลังอบแห้งยังคงลดลงไม่เพิ่มขึ้นตามปริมาณน้ำที่เติมเพิ่ม ซึ่งปูนปลาสเตอร์ยังเป็นปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อการหดตัวหลังอบแห้งของชิ้นงาน ในขณะที่สูตร RP5F-RP8F มีการเติมฟองโฟมในปริมาตร 1 ลิตร และเติมปูนปลาสเตอร์ทุกสูตรในสัดส่วนเดียวกันกับสูตร RP1-RP4 ดังแสดงในตารางที่ 3.4 พบว่าการหดตัวหลังอบแห้งในสูตร RP5F-RP7F มีการหดตัวหลังอบแห้งใกล้เคียงกับสูตรอิฐดินเผา และการหดตัวหลังอบแห้งในสูตร RP8F มีการหดตัวน้อยสุดอย่างเห็นได้ชัด แม้ว่าจะมีการเติมน้ำจากฟองโฟมร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก



ภาพที่ 4.2 การหดตัวหลังอบแห้งของชิ้นงานสูตรอิฐดินเผาและสูตรอิฐมวลเบากลุ่มที่ 2

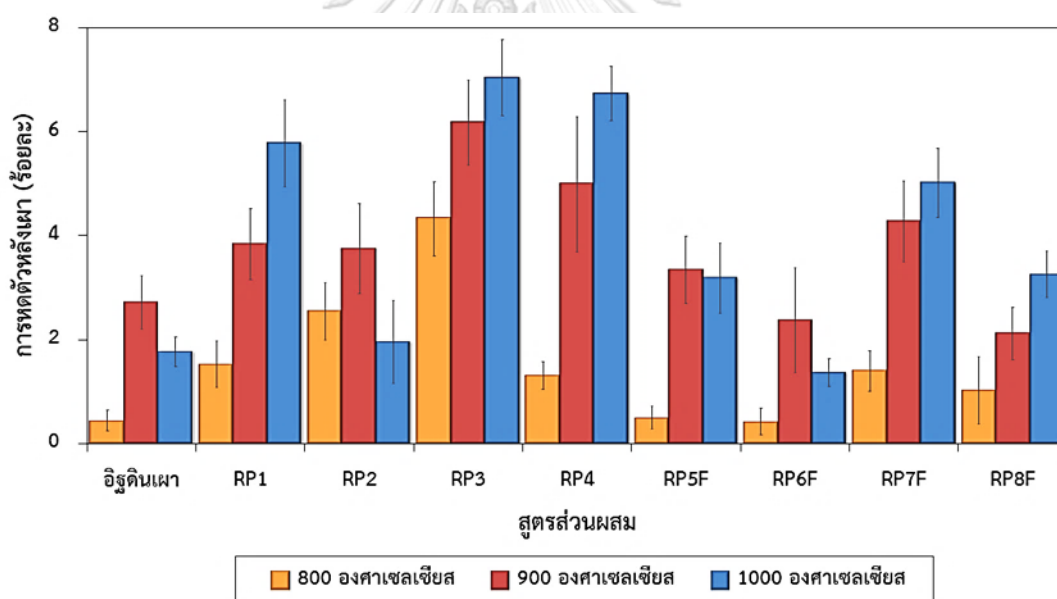
4.6 การหดตัวหลังเผาของชิ้นงานสูตรอิฐมวลเบากลุ่มที่ 2

จากผลการทดสอบการหดตัวหลังเผาของชิ้นงานโดยคำนวณเป็นร้อยละของการหดตัวเชิงเส้นจากสมการที่ 3.2 เมื่อพิจารณาการหดตัวหลังเผาของชิ้นงานสูตรอิฐดินเผาและสูตรอิฐมวลเบา กลุ่มที่ 2 เปรียบเทียบกัน ดังแสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 การหาค่าตัวหลังเผาของชิ้นงานสูตรอิฐมวลเบาในกลุ่มที่ 2 เปรียบเทียบกับสูตรอิฐดินเผา

สูตร	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	การหาค่าตัวหลังเผา (ร้อยละ)
อิฐดินเผา	800	0.44±0.20
	900	2.71±0.51
	1000	1.77±0.28
RP1	800	1.52±0.45
	900	3.83±0.68
	1000	5.77±0.84
RP2	800	2.54±0.55
	900	3.75±0.87
	1000	1.96±0.80
RP3	800	4.32±0.71
	900	6.17±0.82
	1000	7.03±0.73
RP4	800	1.31±0.27
	900	4.99±1.31
	1000	6.73±0.53
RP5F	800	0.50±0.23
	900	3.35±0.65
	1000	3.18±0.68
RP6F	800	0.42±0.26
	900	2.37±1.01
	1000	1.37±0.27
RP7F	800	1.40±0.39
	900	4.28±0.78
	1000	5.01±0.67
RP8F	800	1.02±0.64
	900	2.12±0.50
	1000	3.25±0.44

จากตารางที่ 4.5 และภาพที่ 4.3 แสดงการหดตัวหลังเผาของสูตรอิฐมวลเบาในกลุ่มที่ 2 สูตร RP1-RP4 และการเติมฟองโฟมในสูตร RP5F-RP8F เปรียบเทียบกับสูตรอิฐดินเผา พบว่าชิ้นงานที่มีการหดตัวหลังอบแห้งสูงจะมีการหดตัวหลังเผาลดลง ในทางกลับกันชิ้นงานที่มีการหดตัวหลังอบแห้งที่ต่ำจะมีการหดตัวหลังเผาสูงขึ้น เห็นได้ว่าการหดตัวหลังเผาของชิ้นงานสูตร RP1-RP4 ที่มีการเติมปูนปลาสเตอร์เพิ่มขึ้นมีการหดตัวหลังเผาเพิ่มขึ้นและสูงกว่าสูตรอิฐดินเผา ในขณะที่เดียวกันกับสูตร RP5F-RP8F ที่มีสัดส่วนของปูนปลาสเตอร์เพิ่มขึ้นและมีการเติมฟองโฟม ซึ่งมีการหดตัวหลังอบแห้งที่สูง พบว่าแนวโน้มส่วนใหญ่ของการหดตัวหลังเผาของสูตรที่มีการเติมฟองโฟมจะต่ำกว่าการหดตัวหลังเผาของสูตรอิฐมวลเบาที่ไม่มีการเติมฟองโฟมและสูตรอิฐดินเผา แต่เมื่ออุณหภูมิการเผาเพิ่มขึ้นส่งผลให้มีแนวโน้มของการหดตัวหลังเผาของชิ้นงานมีการหดตัวที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากอนุภาคมีการจัดเรียงตัวเชื่อมติดกันที่อุณหภูมิสูงส่งผลให้ชิ้นงานเกิดการหดตัว ประกอบกับการเกิดโซเดียมซิลเฟตในระบบซึ่งมีจุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 884 องศาเซลเซียส^[5] ส่งผลให้มีของเหลวเกิดขึ้นในกระบวนการเผาผนึกเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการเผาให้สูงขึ้น ชิ้นงานจึงมีการหดตัวมากขึ้น^[22, 48]



ภาพที่ 4.3 การหดตัวหลังเผาของชิ้นงานสูตรอิฐดินเผาและสูตรอิฐมวลเบาในกลุ่มที่ 2

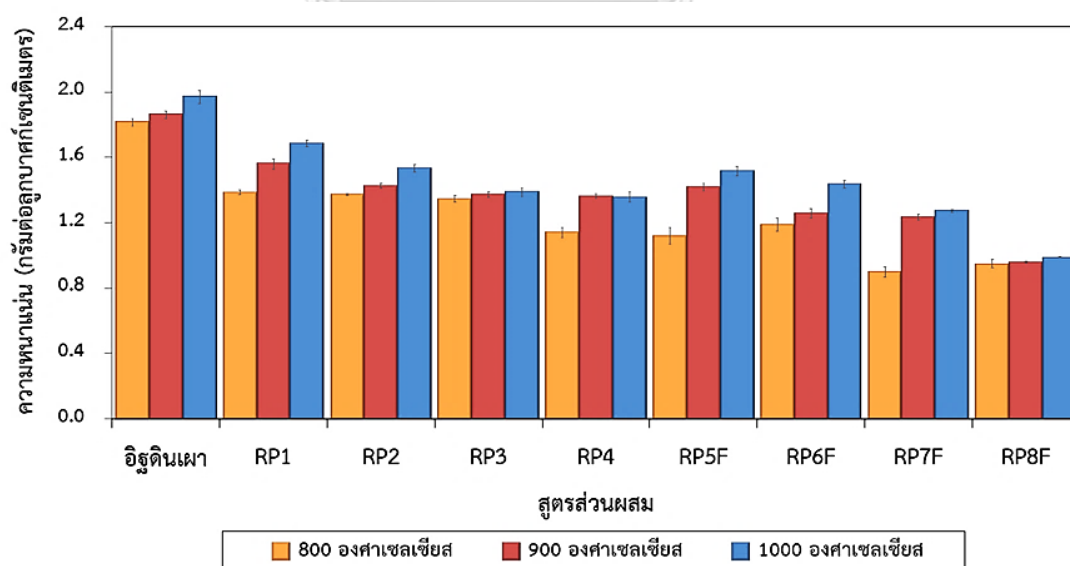
4.7 ความหนาแน่นของชิ้นงานสูตรอิฐมวลเบาในกลุ่มที่ 2

จากการทดสอบความหนาแน่นของชิ้นงานโดยคำนวณเป็นความหนาแน่นรวมจากสมการที่ 3.4 และ 3.5 เมื่อพิจารณาถึงความหนาแน่นของชิ้นงานสูตรอิฐดินเผาและสูตรอิฐมวลเบาในกลุ่มที่ 2 เปรียบเทียบกัน ดังแสดงในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ความหนาแน่นของชิ้นงานสูตรอิฐมวลเบากลุ่มที่ 2 เปรียบเทียบกับสูตรอิฐดินเผา

สูตร	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)
อิฐดินเผา	800	1.81±0.02
	900	1.86±0.02
	1000	1.97±0.04
RP1	800	1.39±0.01
	900	1.56±0.03
	1000	1.68±0.02
RP2	800	1.37±0.01
	900	1.43±0.01
	1000	1.54±0.02
RP3	800	1.34±0.02
	900	1.37±0.02
	1000	1.39±0.03
RP4	800	1.14±0.03
	900	1.36±0.01
	1000	1.36±0.03
RP5F	800	1.12±0.05
	900	1.42±0.02
	1000	1.52±0.03
RP6F	800	1.19±0.04
	900	1.26±0.03
	1000	1.43±0.02
RP7F	800	0.90±0.03
	900	1.23±0.02
	1000	1.27±0.01
RP8F	800	0.95±0.03
	900	0.96±0.01
	1000	0.99±0.00

จากตารางที่ 4.6 และภาพที่ 4.4 แสดงความหนาแน่นของสูตรอิฐมวลเบาในกลุ่มที่ 2 สูตร RP1-RP4 และการเติมฟองโฟมในสูตร RP5F-RP8F เปรียบเทียบกับสูตรอิฐดินเผา พบว่าความหนาแน่นของชิ้นงานในสูตร RP1-RP4 ที่มีการเติมปูนปลาสเตอร์ตั้งแต่ ร้อยละ 5 10 25 และ 50 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ มีความหนาแน่นต่ำกว่าความหนาแน่นของสูตรอิฐดินเผา และชิ้นงานมีความหนาแน่นลดลงตามปริมาณของปูนปลาสเตอร์ที่เพิ่มขึ้น ในสูตร RP1-RP4 ที่กำหนดด้วยสัดส่วนของปูนปลาสเตอร์เพิ่มขึ้นแต่สัดส่วนของดินราชบุรีคงที่ ซึ่งปริมาณของสารละลายโซเดียมซิลิเกตจะต้องเพิ่มขึ้นตามปริมาณของปูนปลาสเตอร์ที่เติม ด้วยเงื่อนไขการทำปฏิกิริยาระหว่างปูนปลาสเตอร์กับโซเดียมซิลิเกตในอัตราส่วน 1:1 เพื่อให้เกิดโครงสร้างเจลของแคลเซียมซิลิเกตและโซเดียมซิลิเกต^[5] ดังสมการที่ 1.1 ซึ่งเป็นโครงสร้างที่ทำให้ชิ้นงานมีความพรุนตัว และการเติมฟองโฟมในปริมาตร 1 ลิตร ในสูตร RP5F-RP8F ซึ่งมีการเติมปูนปลาสเตอร์ตั้งแต่ ร้อยละ 5 10 25 และ 50 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ พบว่าฟองโฟมส่งผลให้ความหนาแน่นของชิ้นงานลดลง เนื่องด้วยฟองโฟมส่งผลให้ชิ้นงานมีรูพรุนหรือความพรุนตัวเกิด แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการเผาเพิ่มขึ้น ชิ้นงานสูตรอิฐดินเผาและสูตรอิฐมวลเบา มีแนวโน้มของความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่ม เนื่องจากอนุภาคมีการจัดเรียงตัวเชื่อมติดกันที่อุณหภูมิสูงส่งผลให้ชิ้นงานเกิดการหดตัวเพื่อเพิ่มความหนาแน่นในกระบวนการเผาผืนึก ประกอบกับการเกิดโซเดียมซิลิเกตในระบบซึ่งมีจุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 884 องศาเซลเซียส เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น การเกิดเฟสแก้วของโซเดียมซิลิเกตจะหลอมแล้วแทรกเข้าไปในรูพรุนของชิ้นงานในกระบวนการเผาผืนึกส่งผลให้ชิ้นงานมีความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้น^[22, 32]



ภาพที่ 4.4 ความหนาแน่นของชิ้นงานสูตรอิฐดินเผาและสูตรอิฐมวลเบาในกลุ่มที่ 2

4.8 การดูดซึมน้ำของชิ้นงานสูตรอิฐมวลเบากลุ่มที่ 2

จากการทดสอบการดูดซึมน้ำของชิ้นงานโดยคำนวณเป็นร้อยละจากสมการที่ 3.3 เมื่อพิจารณาถึงการดูดซึมน้ำของชิ้นงานสูตรอิฐดินเผาและสูตรอิฐมวลเบากลุ่มที่ 2 เปรียบเทียบกัน ดังแสดงในตารางที่ 4.7

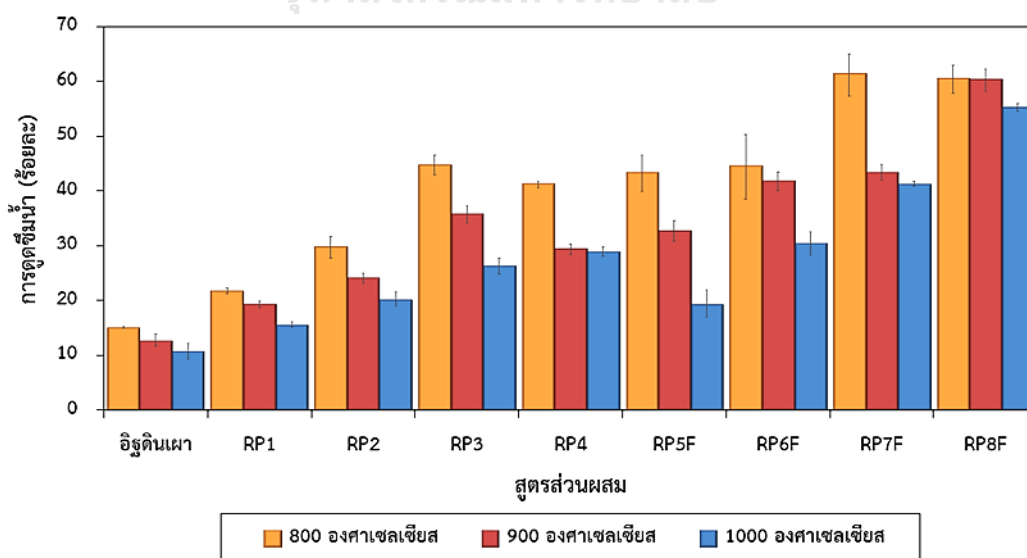
ตารางที่ 4.7 การดูดซึมน้ำของชิ้นงานสูตรอิฐมวลเบากลุ่มที่ 2 เปรียบเทียบกับสูตรอิฐดินเผา

สูตร	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	การดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)
อิฐดินเผา	800	15.07±0.19
	900	12.72±1.12
	1000	10.77±1.45
RP1	800	21.76±0.56
	900	19.30±0.66
	1000	15.62±0.48
RP2	800	29.72±1.96
	900	24.10±0.98
	1000	20.27±1.24
RP3	800	44.75±1.76
	900	35.71±1.55
	1000	26.33±1.49
RP4	800	41.19±0.59
	900	29.42±0.95
	1000	28.98±0.89
RP5F	800	43.24±3.26
	900	32.69±1.83
	1000	19.43±2.50
RP6F	800	44.44±5.88
	900	41.74±1.66
	1000	30.42±2.12

ตารางที่ 4.7 การดูดซึมน้ำของชิ้นงานสูตรอิฐมวลเบากลุ่มที่ 2 เปรียบเทียบกับสูตรอิฐดินเผา (ต่อ)

สูตร	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	การดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)
RP7F	800	61.18±3.77
	900	43.38±1.44
	1000	41.31±0.45
RP8F	800	60.42±2.51
	900	60.30±2.05
	1000	55.24±0.70

จากตารางที่ 4.7 และภาพที่ 4.5 พบว่าการดูดซึมน้ำขึ้นอยู่กับความพรุนตัวของชิ้นงาน ซึ่งชิ้นงานที่มีความพรุนตัวสูงจะมีการดูดซึมน้ำที่สูง จากการทดสอบความหนาแน่นของสูตร RP1-RP8F จากตารางที่ 4.6 ซึ่งชิ้นงานมีความหนาแน่นลดลงหรือมีความตัวเพิ่มขึ้นเมื่อเติมปูนปลาสเตอร์เพิ่มขึ้น และการเติมฟองโฟมจะส่งผลต่อความหนาแน่นที่ลดลงอีก เห็นได้ว่าการดูดซึมน้ำของชิ้นงานในสูตร RP1-RP4 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความหนาแน่นของชิ้นงานที่ลดลง และการเติมฟองโฟมในสูตร RP5F-RP8F ซึ่งเป็นปัจจัยหลักในการเพิ่มจำนวนรูพรุนให้กับชิ้นงาน สูตรที่มีการเติมฟองโฟมจึงมีการดูดซึมน้ำที่มากกว่าสูตร RP1-RP4 และสูตรอิฐดินเผา ในขณะที่เดียวกันการเพิ่มอุณหภูมิการเผาส่งผลให้การดูดซึมน้ำลดลง เนื่องด้วยในกระบวนการเผาผนึกที่อุณหภูมิสูงชิ้นงานจะมีการจัดเรียงตัวของอนุภาคที่เชื่อมกันส่งผลให้รูพรุนมีขนาดเล็กลงและความหนาแน่นของชิ้นงานเพิ่มขึ้น^[22, 23, 32] อย่างไรก็ตาม การลดความหนาแน่นถือเป็นหลักการพื้นฐานในการพัฒนาอิฐดินเผาให้เป็นอิฐมวลเบา ดังนั้นจึงต้องยอมรับเงื่อนไขของการดูดซึมน้ำของชิ้นงานที่เพิ่มขึ้นด้วย



ภาพที่ 4.5 การดูดซึมน้ำของชิ้นงานสูตรอิฐเผาและสูตรอิฐมวลเบากลุ่มที่ 2

4.9 ความต้านทานแรงอัดของชิ้นงานสูตรอิฐมวลเบากลุ่มที่ 2

จากการทดสอบความต้านทานแรงอัดของชิ้นงานโดยคำนวณจากสมการที่ 3.6 และ 3.7 เมื่อพิจารณาถึงความต้านทานแรงอัดของชิ้นงานสูตรอิฐดินเผาและสูตรอิฐมวลเบากลุ่มที่ 2 เปรียบเทียบกัน ดังแสดงในตารางที่ 4.8

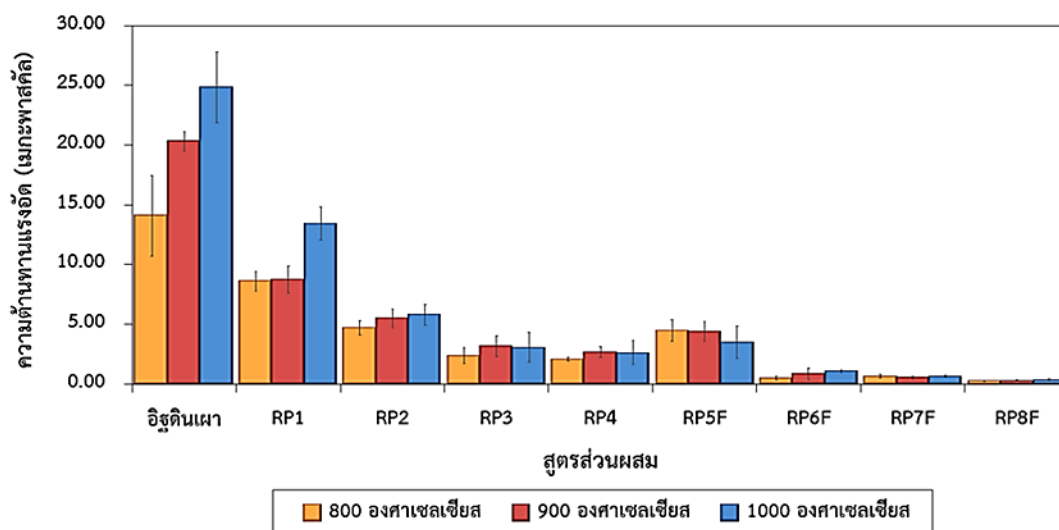
ตารางที่ 4.8 ความต้านทานแรงอัดของชิ้นงานสูตรอิฐมวลเบากลุ่มที่ 2 เปรียบเทียบกับสูตรอิฐดินเผา

สูตร	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความต้านทานแรงอัด (เมกะพาสคัล)
อิฐดินเผา	800	14.09±3.37
	900	20.30±0.80
	1000	24.84±2.98
RP1	800	8.60±0.83
	900	8.76±1.12
	1000	13.42±1.40
RP2	800	4.71±0.61
	900	5.51±0.79
	1000	5.79±0.84
RP3	800	2.38±0.70
	900	3.16±0.87
	1000	3.08±1.25
RP4	800	2.08±0.17
	900	2.64±0.45
	1000	2.62±1.00
RP5F	800	4.47±0.88
	900	4.39±0.82
	1000	3.48±1.34
RP6F	800	0.48±0.13
	900	0.84±0.46
	1000	1.07±0.10

ตารางที่ 4.8 ความต้านทานแรงอัดของชิ้นงานสูตรอิฐมวลเบากลุ่มที่ 2 เปรียบเทียบกับสูตรอิฐดินเผา (ต่อ)

สูตร	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความต้านทานแรงอัด (เมกะพาสคัล)
RP7F	800	0.64±0.13
	900	0.54±0.12
	1000	0.63±0.08
RP8F	800	0.27±0.02
	900	0.31±0.02
	1000	0.36±0.06

จากตารางที่ 4.8 และภาพที่ 4.6 แสดงความต้านทานแรงอัดของชิ้นงานสูตรอิฐมวลเบากลุ่มที่ 2 สูตร RP1-RP4 และการเติมฟองโฟมในสูตร RP5F-RP8F เปรียบเทียบกับสูตรอิฐดินเผา พบว่าความต้านทานแรงอัดของชิ้นงานสูตร RP1-RP4 ที่มีการเติมปูนปลาสเตอร์ตั้งแต่ ร้อยละ 5 10 25 และ 50 โดยน้ำหนัก ให้ทำปฏิกิริยาในอัตราส่วน 1:1 กับสารละลายโซเดียมซิลิเกต โดยสัดส่วนของดินราชบุรีคงที่ ซึ่งความต้านทานแรงอัดของชิ้นงานหลังเผาจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบเฟสในดินราชบุรี อย่างเช่น เกอไลไนต์ ($Al_2Si_2O_5(OH)$) และควอตซ์ (SiO_2)^[16] ที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของชิ้นงานที่เกิดขึ้นในกระบวนการเผาผนึก เมื่อสัดส่วนของปูนปลาสเตอร์ที่เติมเพิ่มขึ้นมีมากกว่าดินราชบุรี ความแข็งแรงของชิ้นงานจึงลดลง เมื่อเติมปูนปลาสเตอร์ในปริมาณที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อการเกิดโครงสร้างเจลของแคลเซียมซิลิเกตเพิ่มขึ้นประกอบกับความพรุนตัวในชิ้นงานเพิ่มขึ้นตาม ส่งผลให้ความต้านทานแรงอัดของชิ้นงานลดลงเมื่อเทียบกับสูตรอิฐดินเผา และการเติมฟองโฟมในสูตร RP5F-RP8F ยังส่งผลต่อความต้านทานแรงอัดของชิ้นงานลดลงอีกด้วย เนื่องจากรูพรุนที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากฟองโฟม แต่การเพิ่มอุณหภูมิการเผาเพิ่มขึ้นช่วยส่งผลให้เกิดการเชื่อมกันระหว่างอนุภาคปิโตรพูนในชิ้นงานให้แน่นขึ้นประกอบกับการหลอมของโซเดียมซิลิเกตที่อุณหภูมิ 884 องศาเซลเซียส ซึ่งทำให้มีของเหลวเกิดขึ้นในกระบวนการเผาผนึกส่งผลให้มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นและความต้านทานแรงอัดของชิ้นงานเพิ่มขึ้นตาม เห็นได้ว่าการลดปริมาณปูนปลาสเตอร์ลงหรือทดแทนด้วยวัสดุที่ สามารถเพิ่มความพรุนตัว ในขณะที่เดียวกันต้องมีองค์ประกอบทางเคมีที่ส่งผลต่อความแข็งแรงเหมือนดินราชบุรีจะทำให้ได้ชิ้นงานที่มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 4.6 ความต้านทานแรงอัดของชิ้นงานสูตรอิฐดินเผาและสูตรอิฐมวลเบากลุ่มที่ 2

4.10 สีของชิ้นงานสูตรอิฐมวลเบากลุ่มที่ 2

จากการวิเคราะห์สีของชิ้นงานโดยวิเคราะห์เป็นค่า L^* และ b^* เมื่อพิจารณาสีของชิ้นงานสูตรอิฐดินเผาและสูตรอิฐมวลเบากลุ่มที่ 2 เปรียบเทียบกัน ดังแสดงในตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ค่า L^* และ b^* ของชิ้นงานสูตรอิฐดินเผาและสูตรอิฐมวลเบากลุ่มที่ 2

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	สูตร	$L^{[n]}$	a^* , [ข]	b^* , [ค]
800	อิฐดินเผา	64.91	16.41	28.28
	RP1	67.18	14.46	26.26
	RP2	66.44	12.12	25.41
	RP3	67.14	10.71	21.17
	RP4	68.98	13.15	24.97
	RP5F	58.09	16.91	27.19
	RP6F	60.67	11.06	19.82
	RP7F	65.21	12.61	25.82
	RP8F	67.79	9.62	21.08

ตารางที่ 4.9 ค่า L a^* และ b^* ของชิ้นงานสูตรอิฐดินเผาและสูตรอิฐมวลเบา กลุ่มที่ 2 (ต่อ)

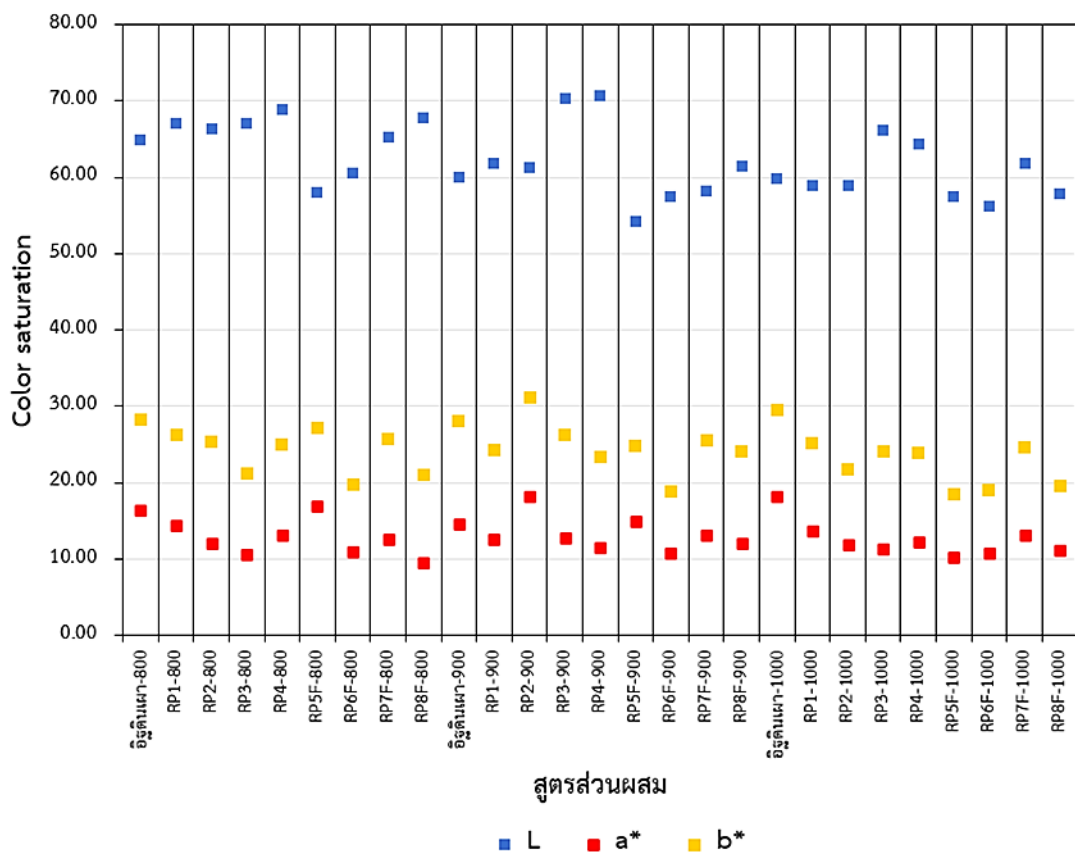
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	สูตร	L [ก]	a^* , [ข]	b^* , [ค]
900	อิฐดินเผา	60.13	14.63	28.13
	RP1	61.93	12.68	24.33
	RP2	61.31	18.30	31.20
	RP3	70.35	12.83	26.36
	RP4	70.75	11.61	23.31
	RP5F	54.28	14.89	24.87
	RP6F	57.60	10.77	18.95
	RP7F	58.25	13.24	25.56
	RP8F	61.52	12.17	24.14
1000	อิฐดินเผา	59.86	18.22	29.46
	RP1	58.94	13.62	25.13
	RP2	58.93	11.92	21.80
	RP3	66.27	11.41	24.14
	RP4	64.45	12.31	23.97
	RP5F	57.59	10.23	18.51
	RP6F	56.17	10.85	19.10
	RP7F	61.87	13.16	24.60
	RP8F	57.90	11.19	19.62

หมายเหตุ [ก] ค่า L เป็นค่าที่แสดงความสว่างของชิ้นงาน ในช่วงค่า L เป็นบวก บ่งบอกว่าชิ้นงานมีความสว่าง และค่า L เป็นลบ บ่งบอกว่าชิ้นงานมีความทึบ

[ข] ค่า a^* เป็นค่าที่แสดงสีของชิ้นงาน ในช่วงค่า a^* เป็นบวก บ่งบอกว่าชิ้นงานมีสีแดง และค่า a^* เป็นลบ บ่งบอกว่าชิ้นงานมีสีเขียว

[ค] ค่า b^* เป็นค่าที่แสดงสีของชิ้นงาน ในช่วงค่า b^* เป็นบวก บ่งบอกว่าชิ้นงานมีสีเหลือง และค่า b^* เป็นลบ บ่งบอกว่าชิ้นงานมีสีน้ำเงิน

จากตารางที่ 4.9 และภาพที่ 4.7-4.8 แสดงสีของชิ้นงานหลังเผาสูตรอิฐมวลเบากลุ่มที่ 2 สูตร RP1-RP4 และการเติมฟองโฟมในสูตร RP5F-RP8F เปรียบเทียบกับสูตรอิฐดินเผา พบว่าชิ้นงานหลังเผาของสูตรอิฐดินเผาจะมีสีส้มถึงสีส้มเข้มสังเกตได้จากค่าที่อยู่ในช่วง a^* และ b^* ที่แสดงในช่วงสีแดงกับสีเหลืองตามลำดับ และชิ้นงานมีสีส้มเข้มขึ้นเมื่อเผาชิ้นงานที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้น ตามการสุกตัวของดินราชบุรีที่เพิ่มตาม สูตร RP1-RP8F มีค่า a^* และ b^* ที่แสดงในช่วงสีแดงกับสีเหลืองตามลำดับเหมือนกัน แต่การเติมปูนปลาสเตอร์ในสูตร RP1-RP4 ที่มีการเติมปูนปลาสเตอร์เพิ่มขึ้นตามลำดับในขณะที่สัดส่วนของดินราชบุรีลดลง ส่งผลให้ชิ้นงานมีสีส้มอ่อนลงหรือมีความสว่างเพิ่มขึ้นสังเกตได้จากค่า L ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเพิ่มขึ้นตามปริมาณของปูนปลาสเตอร์ที่เติม ในขณะที่เดียวกันการเติมฟองโฟมในสูตร RP5F-RP8F พบว่าค่า L มีค่าลดลง ชิ้นงานมีสีส้มที่ทึบหรือเข้มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับสูตร RP1-RP4 ที่ไม่มีการเติมฟองโฟมแต่เติมปูนปลาสเตอร์ในสัดส่วนเดียวกัน ซึ่งผลจากการเติมฟองโฟมส่งผลให้ชิ้นงานมีความพรุนตัวสูง ความร้อนจากการเผาสามารถสัมผัสกับพื้นผิวของชิ้นงานได้มากขึ้น การสุกตัวจึงเกิดขึ้นได้เร็วทำให้ชิ้นงานหลังเผาจึงมีสีส้มที่ทึบหรือเข้มขึ้น และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการเผาเพิ่มขึ้นในสูตร RP5F-RP8F จะสีที่เข้มและทึบเพิ่มขึ้นจากเดิม



ภาพที่ 4.7 สีของชิ้นงานสูตรอิฐดินเผาและสูตรอิฐมวลเบากลุ่มที่ 2

สูตรส่วนผสม	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)		
	800	900	1000
อิฐดินเผา			
RP1			
RP2			
RP3			
RL4			
RP5F			
RP6F			
RP7F			
RP8F			

ภาพที่ 4.8 ชิ้นงานสูตรอิฐดินเผาและสูตรอิฐมวลเบากลุ่มที่ 2

4.11 การหัดตัวหลังอบแห้งของชิ้นงานสูตรอิฐมวลเบากลุ่มที่ 3

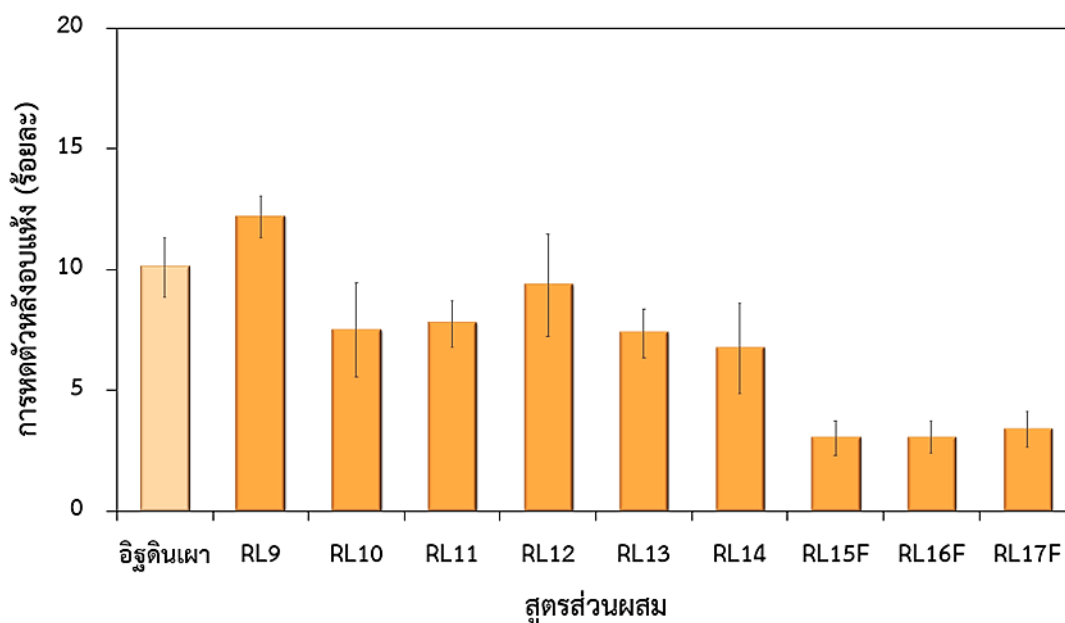
จากการทดสอบการหัดตัวหลังอบแห้งของชิ้นงานโดยคำนวณเป็นร้อยละของการหัดตัวเชิงเส้นจากสมการที่ 3.1 เมื่อพิจารณาการหัดตัวของชิ้นงานสูตรอิฐดินเผาและสูตรอิฐมวลเบากลุ่มที่ 3 เปรียบเทียบกัน ดังแสดงในตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 การหัดตัวหลังอบแห้งของชิ้นงานสูตรอิฐมวลเบากลุ่มที่ 3 เปรียบเทียบกับสูตรอิฐดินเผา

สูตร	การหัดตัวหลังอบแห้ง (ร้อยละ)
อิฐดินเผา	10.10±1.23
RL9	12.19±0.86
RL10	7.50±1.92
RL11	7.75±0.98
RL12	9.35±2.13
RL13	7.36±1.01
RL14	6.74±1.86
RL15F	3.03±0.70
RL16F	3.05±0.67
RL17F	3.39±0.74

จากตารางที่ 4.10 และภาพที่ 4.9 แสดงการหัดตัวหลังอบแห้งของสูตรอิฐมวลเบากลุ่มที่ 3 สูตร RL9-RP14 และสูตร RP15F-RP17F ที่มีการเติมฟองโฟม เปรียบเทียบกับสูตรอิฐดินเผา พบว่าชิ้นงานสูตร RL9 ที่มีการเติมเส้นใยแก้วใยสังเคราะห์ ร้อยละ 33.33 โดยน้ำหนัก แทนที่ดินราชบุรี สูตร RL10 และ RL11 ที่มีการเติมเส้นใยแก้วใยสังเคราะห์ ร้อยละ 25 และ 50 โดยน้ำหนัก โดยกำหนดให้สัดส่วนของปูนปลาสเตอร์คงที่ ร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก จากการทดสอบการหัดตัวหลังอบแห้งของชิ้นงาน พบว่าสูตร RL9 ซึ่งมีการเติมน้ำมากกว่าสูตรอิฐดินเผา มีการหัดตัวหลังอบแห้งใกล้เคียงกับอิฐดินเผา ในขณะที่สูตร RL10-RL11 มีการหัดตัวหลังอบแห้งลดลงเมื่อเทียบกับสูตรอิฐดินเผา เนื่องจากเส้นใยแก้วใยสังเคราะห์เป็นวัสดุที่เปราะและไม่มีความเหนียวเหมือนปูนปลาสเตอร์ ทำให้ความเหนียวของดินราชบุรีลดลง เมื่อทำการเติมเส้นใยแก้วใยสังเคราะห์ในปริมาณที่เพิ่มขึ้นจึงส่งผลให้การหัดตัวหลังอบแห้งของชิ้นงานลดลงตามไปด้วย ในสูตร RL12-RL14 ที่กำหนดปูนปลาสเตอร์ให้เป็น ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก พบว่าการหัดตัวหลังอบแห้งของชิ้นงานยังคงมีการหัดตัวลดลงตามปริมาณ ซึ่งสูตร RL12-RL14 ในทางกลับกันการเติมฟองโฟมในสูตร RL15F-RL17F ซึ่งมีการเติมเส้นใยแก้วใยสังเคราะห์เพิ่มขึ้นตามลำดับ กลับช่วยลด

การหดตัวหลังอบแห้งได้เพิ่มขึ้นมากกว่าการไม่เติมฟองโฟมในสูตร RL9-RL14 และสูตรอิฐดินเผา เนื่องด้วยฟองโฟมลดแรงตึงผิวของน้ำลงได้ทำให้น้ำระเหยออกจากชิ้นงานได้ง่าย^[26, 27] ส่งผลให้ชิ้นงานเกิดการหดตัวเพื่อกำจัดน้ำออก เห็นได้ว่าการเติมฟองโฟมสามารถลดการหดตัวหลังอบแห้งได้



ภาพที่ 4.9 การหดตัวหลังอบแห้งของชิ้นงานสูตรอิฐดินเผาและสูตรอิฐมวลเบากลุ่มที่ 3

4.12 การหดตัวหลังเผาของชิ้นงานสูตรอิฐมวลเบากลุ่มที่ 3

จากการทดสอบการหดตัวหลังเผาของชิ้นงานโดยคำนวณเป็นร้อยละของการหดตัวเชิงเส้นจากสมการที่ 3.1 เมื่อพิจารณาการหดตัวของชิ้นงานสูตรอิฐดินเผาและสูตรอิฐมวลเบากลุ่มที่ 3 ดังแสดงในตารางที่ 4.11

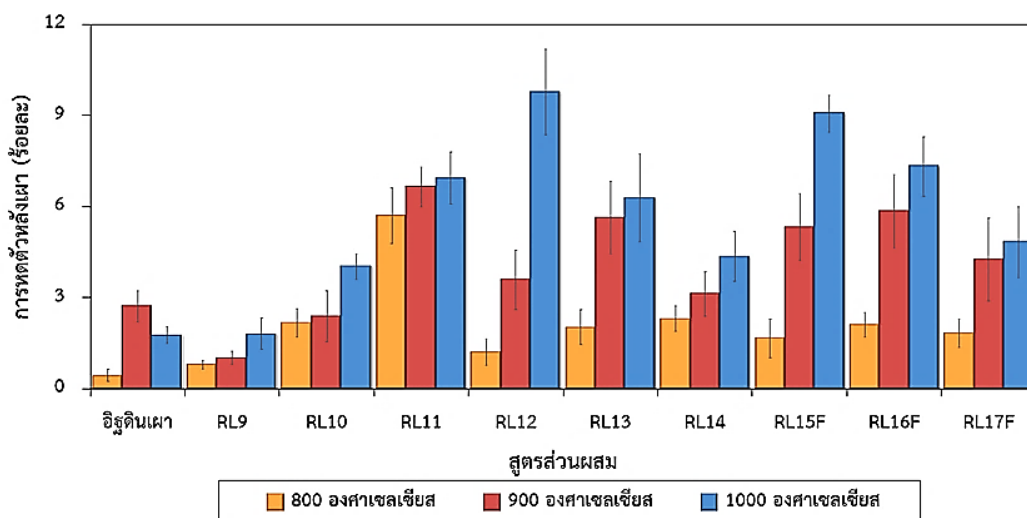
ตารางที่ 4.11 การหดตัวหลังเผาของชิ้นงานสูตรอิฐมวลเบากลุ่มที่ 3 เปรียบเทียบกับสูตรอิฐดินเผา

สูตร	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	การหดตัวหลังเผา (ร้อยละ)
อิฐดินเผา	800	0.44±0.20
	900	2.71±0.51
	1000	1.77±0.28

ตารางที่ 4.11 การหัดตัวหลังเผาของชิ้นงานสูตรอิฐมวลเบากลุ่มที่ 3 เปรียบเทียบกับสูตรอิฐดินเผา (ต่อ)

สูตร	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	การหัดตัวหลังเผา (ร้อยละ)
RL9	800	0.78±0.14
	900	1.01±0.21
	1000	1.81±0.50
RL10	800	2.17±0.47
	900	2.37±0.84
	1000	4.02±0.42
RL11	800	5.69±0.92
	900	6.65±0.66
	1000	6.94±0.86
RL12	800	1.20±0.43
	900	3.59±0.98
	1000	9.76±1.41
RP13	800	2.02±0.58
	900	5.63±1.21
	1000	6.29±1.45
RL14	800	2.31±0.42
	900	3.12±0.74
	1000	4.35±0.83
RL15F	800	1.65±0.64
	900	5.32±1.10
	1000	9.07±0.60
RL16F	800	2.09±0.40
	900	5.83±1.21
	1000	7.32±0.97
RL17F	800	1.82±0.47
	900	4.25±1.36
	1000	4.83±1.16

จากตารางที่ 4.11 และภาพที่ 4.10 แสดงการหัดตัวหลังเผาของสูตรอิฐมวลเบากลุ่มที่ 3 จากการทดสอบการหัดตัวหลังเผาของชิ้นงาน พบว่าสูตร RL9 ซึ่งมีการหัดตัวหลังอบแห้งที่สูงแต่มีการหัดตัวหลังเผาต่ำลง เมื่อเปรียบเทียบกับสูตร RL10-RL11 กับสูตรอิฐดินเผาที่มีการหัดตัวหลังอบแห้งที่น้อยกว่า การหัดตัวหลังเผาจึงมีค่าที่สูงตาม ในขณะที่การเติมเส้นใยแก้วใยไฟเบอร์เพิ่มขึ้นในสูตร RL12-RL14 และสูตร RL15F-RL17F ที่มีการเติมฟองโฟม มีการหัดตัวหลังเผาที่ใกล้เคียงกัน แต่เมื่อเปรียบเทียบกับ การหัดตัวหลังเผาของอิฐดินเผาแล้ว พบว่าสูตร RL12-RL17F จะมีการหัดตัวหลังเผาที่มากกว่า ในการเผาของสูตรเดียวกันที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้น พบว่าแนวโน้มการหัดตัวของชิ้นงานเพิ่มขึ้น เนื่องจากการหัดตัวในกระบวนการเผาผนึกเพื่อให้อนุภาคเกิดการจัดเรียงตัวชิดกัน และการหลอมของโซเดียมซัลเฟตส่งผลให้มีของเหลวเกิดขึ้นในระบบ การหัดตัวหลังเผาจึงเพิ่มขึ้น^[22]



ภาพที่ 4.10 การหัดตัวหลังเผาของชิ้นงานสูตรอิฐดินเผาและสูตรอิฐมวลเบากลุ่มที่ 3

4.13 ความหนาแน่นของชิ้นงานสูตรอิฐมวลเบากลุ่มที่ 3

จากผลการทดสอบความหนาแน่นของชิ้นงานโดยคำนวณเป็นความหนาแน่นรวมจากสมการที่ 3.4 และ 3.5 เมื่อพิจารณาถึงความหนาแน่นของชิ้นงานสูตรอิฐดินเผาและสูตรอิฐมวลเบากลุ่มที่ 3 ดังแสดงในตารางที่ 4.12

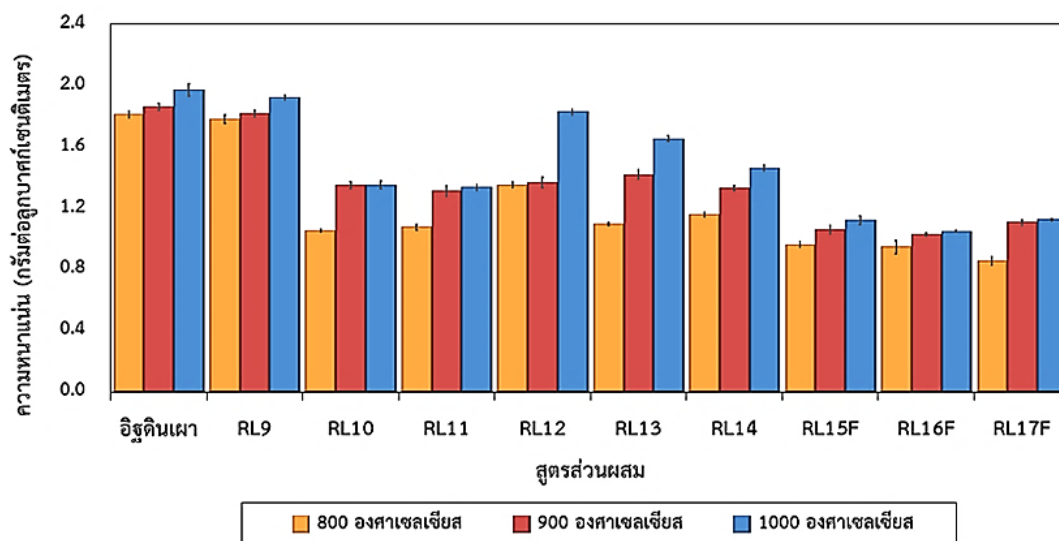
ตารางที่ 4.12 ความหนาแน่นของชิ้นงานสูตรอิฐมวลเบากลุ่มที่ 3 เปรียบเทียบกับสูตรอิฐดินเผา

สูตร	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)
อิฐดินเผา	800	1.81±0.02
	900	1.86±0.02
	1000	1.97±0.04
RL9	800	1.78±0.03
	900	1.81±0.02
	1000	1.92±0.02
RL10	800	1.05±0.01
	900	1.35±0.02
	1000	1.35±0.02
RP11	800	1.08±0.02
	900	1.31±0.04
	1000	1.33±0.02
RL12	800	1.35±0.02
	900	1.37±0.04
	1000	1.83±0.02
RL13	800	1.10±0.01
	900	1.42±0.03
	1000	1.65±0.02
RL14	800	1.16±0.02
	900	1.33±0.01
	1000	1.46±0.02

ตารางที่ 4.12 ความหนาแน่นของชิ้นงานสูตรอิฐมวลเบากลุ่มที่ 3 เปรียบเทียบกับสูตรอิฐดินเผา (ต่อ)

สูตร	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)
RL15F	800	0.96±0.02
	900	1.06±0.03
	1000	1.12±0.03
RL16F	800	0.95±0.04
	900	1.03±0.01
	1000	1.05±0.00
RL17F	800	0.86±0.03
	900	1.11±0.02
	1000	1.12±0.01

จากตารางที่ 4.12 และภาพที่ 4.11 แสดงความหนาแน่นของสูตรอิฐมวลเบากลุ่มที่ 3 สูตร RL9-RL14 และการเติมฟองโฟมในสูตร RL15F-RL17F เปรียบเทียบกับสูตรอิฐดินเผา พบว่าความหนาแน่นที่ลดลงของสูตร RL10-RL11 ส่วนหนึ่งเป็นผลมาจากความพรุนตัวสูงจากสัดส่วนของปูนปลาสเตอร์คงที่ ร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก แต่ความหนาแน่นของชิ้นงานสูตร RL9-RL11 ลดลงเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของเก้าหนักลิกไนต์ เปรียบเทียบกับสูตร RL9 ที่มีการเติมเฉพาะเก้าหนักลิกไนต์ที่และสูตรอิฐดินเผาที่มีความหนาแน่นมากกว่าตามลำดับ สูตร RL12-RL14 ที่มีการเติมเก้าหนักลิกไนต์ตั้งแต่ ร้อยละ 20 40 และ 60 โดยน้ำหนัก และกำหนดสัดส่วนของปูนปลาสเตอร์เป็นร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก คงที่ในสูตร RL12-RL14 พบว่าความพรุนตัวของชิ้นงานมีความพรุนตัวในระดับหนึ่งซึ่งเป็นผลมาจากปูนปลาสเตอร์ทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมซิลิเกตที่ส่งผลให้เกิดโครงสร้างเจลพรุนตัวของแคลเซียมซิลิเกตและโซเดียมซิลิเกต^[5] เมื่อมีการเติมเก้าหนักลิกไนต์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความพรุนตัวของชิ้นงานเพิ่มขึ้นตามหรือมีความหนาแน่นที่ลดลง เห็นได้ว่าเก้าหนักลิกไนต์ซึ่งเป็นอนุภาคที่มีความพรุนตัวมีผลต่อการลดความหนาแน่นของชิ้นงาน ประกอบกับเก้าหนักลิกไนต์มีจุดสุกตัวสูงกว่าดินราชบุรีซึ่งชิ้นงานถูกเผาที่อุณหภูมิ 800-1000 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ดินราชบุรีมีการสุกตัวก่อนเก้าหนักลิกไนต์ และในขณะเดียวกันเมื่อเติมฟองโฟมในสูตร RL15F-RL17F ตามลำดับ พบว่าฟองโฟมเป็นปัจจัยหลักที่เพิ่มจำนวนรูพรุนให้กับชิ้นงาน ซึ่งส่งผลให้ชิ้นงานมีความพรุนตัวที่สูงหรือความหนาแน่นที่ลดลง แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการเผาให้สูงขึ้น พบว่าความหนาแน่นของชิ้นงานในทุกสูตรมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น ด้วยเก้าหนักลิกไนต์ที่ทดแทนดินราชบุรีเริ่มมีการสุกตัวตามอุณหภูมิที่เพิ่มรูพรุนในชิ้นงานถูกอนุภาคกลืนแล้วจัดเรียงตัวให้ชิดกัน และการหลอมเกิดเฟสแก้วของโซเดียมซิลิเกตแทรกตามรูพรุนภายในชิ้นงานในกระบวนการเผาผนึกส่งผลให้ชิ้นงานมีความหนาแน่นสูงขึ้น^[41, 48]



ภาพที่ 4.11 ความหนาแน่นของขึ้นงานสูตรอิฐดินเผาและสูตรอิฐมวลเบากลุ่มที่ 3

4.14 การดูดซึมน้ำของขึ้นงานสูตรอิฐมวลเบากลุ่มที่ 3

จากการทดสอบการดูดซึมน้ำของขึ้นงานโดยคำนวณเป็นร้อยละจากสมการที่ 3.3 เมื่อพิจารณาถึงการดูดซึมน้ำของขึ้นงานสูตรอิฐดินเผา และสูตรอิฐมวลเบากลุ่มที่ 3 เปรียบเทียบกัน ดังแสดงในตารางที่ 4.13

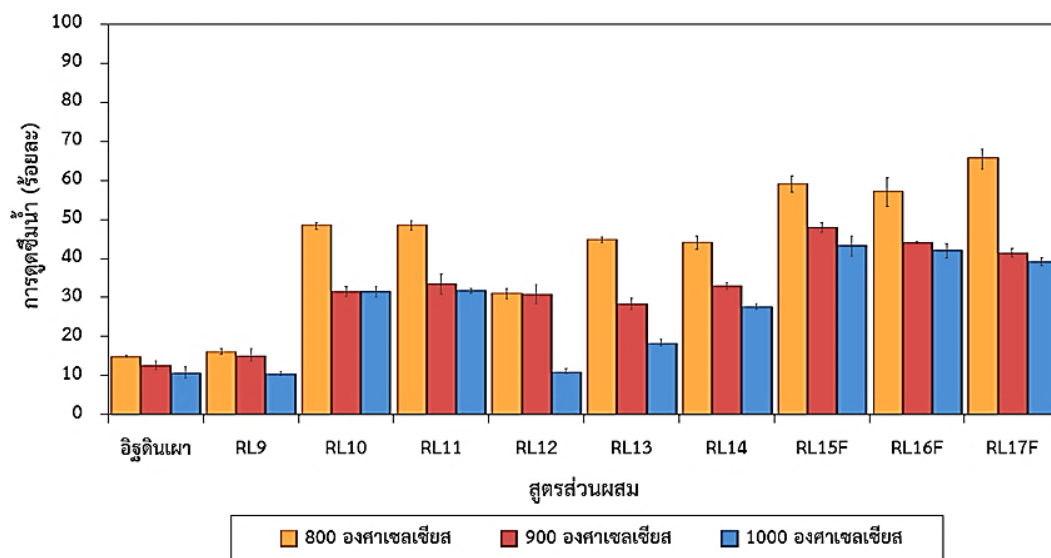
ตารางที่ 4.13 การดูดซึมน้ำของขึ้นงานสูตรอิฐมวลเบากลุ่มที่ 3 เปรียบเทียบกับสูตรอิฐดินเผา

สูตร	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	การดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)
อิฐดินเผา	800	15.07±0.19
	900	12.72±1.12
	1000	10.77±1.45

ตารางที่ 4.13 การดูดซึมน้ำของชิ้นงานสูตรอิฐมวลเบากลุ่มที่ 3 เปรียบเทียบกับสูตรอิฐดินเผา (ต่อ)

สูตร	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	การหดตัวหลังเผา (ร้อยละ)
RL9	800	16.17±0.66
	900	15.35±1.52
	1000	10.56±0.46
RL10	800	48.32±0.77
	900	31.62±1.24
	1000	31.51±1.39
RL11	800	48.46±1.27
	900	33.43±2.53
	1000	31.78±0.66
RL12	800	31.03±1.27
	900	30.87±2.53
	1000	11.19±0.63
RP13	800	44.71±0.74
	900	28.38±1.46
	1000	18.51±0.83
RL14	800	44.04±1.69
	900	33.03±0.86
	1000	27.66±0.78
RL15F	800	59.00±2.04
	900	47.89±1.28
	1000	43.24±2.50
RL16F	800	56.95±3.66
	900	44.03±0.36
	1000	41.97±1.82
RL17F	800	65.39±2.64
	900	41.45±1.10
	1000	39.24±1.01

จากตารางที่ 4.13 และภาพที่ 4.12 พบว่าการดูดซึมน้ำขึ้นอยู่กับความพรุนตัวของชิ้นงาน จากการทดสอบความหนาแน่นของสูตร RL9-RL17F ในตารางที่ 4.12 สังเกตได้ว่าชิ้นงานมีความหนาแน่นลดลงเมื่อเติมเส้นใยแก้วเพิ่มมากขึ้น อีกทั้งในสูตรที่มีการเติมปูนปลาสเตอร์ซึ่งมีความพรุนตัวอยู่ในระดับหนึ่ง เมื่อเติมเส้นใยแก้วเพิ่มจะส่งเสริมให้มีความพรุนตัวที่เพิ่มขึ้น ซึ่งชิ้นงานที่มีความพรุนตัวสูงจะมีการดูดซึมน้ำที่มาก จากที่กล่าวมาจะสังเกตได้ว่าการเติมฟองโฟมส่งผลต่อการเกิดรูพรุนภายในชิ้นงานอย่างมีนัยสำคัญ จากการทดสอบการดูดซึมน้ำของชิ้นงานในสูตร RL15F-RL17F พบว่ามีการดูดซึมน้ำที่สูงเมื่อเปรียบเทียบกับสูตรที่ไม่มีการเติมฟองโฟมและสูตรอิฐดินเผา ในอีกแง่หนึ่งของอุณหภูมิการเผาที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อการดูดซึมน้ำของชิ้นงานในสูตรเดียวกันได้เช่นกัน จากการเพิ่มอุณหภูมิในการเผา พบว่าชิ้นงานมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นส่งผลให้การดูดซึมน้ำของชิ้นงานมีแนวโน้มลดลงในทุกสูตร



ภาพที่ 4.12 การดูดซึมน้ำของชิ้นงานสูตรอิฐดินเผาและสูตรอิฐมวลเบา กลุ่มที่ 3

4.15 ความต้านทานแรงอัดของชิ้นงานสูตรอิฐมวลเบา กลุ่มที่ 3

จากการทดสอบความต้านทานแรงอัดของชิ้นงานโดยคำนวณจากสมการที่ 3.6 และ 3.7 เมื่อพิจารณาถึงความต้านทานแรงอัดของชิ้นงานสูตรอิฐดินเผาและสูตรอิฐมวลเบา กลุ่มที่ 3 ดังแสดงในตารางที่ 4.14

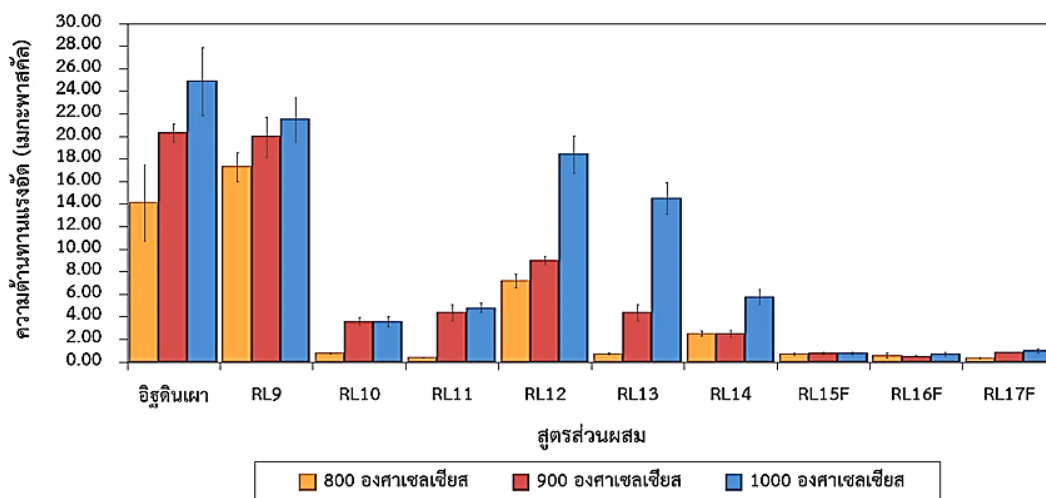
ตารางที่ 4.14 ความต้านทานแรงอัดของชิ้นงานสูตรอิฐมวลเบากลุ่มที่ 3 เปรียบเทียบกับสูตรอิฐดินเผา

สูตร	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความต้านทานแรงอัด (เมกะพาสคัล)
อิฐดินเผา	800	14.09±3.37
	900	20.30±0.80
	1000	24.84±2.98
RL9	800	17.26±1.27
	900	19.96±1.76
	1000	21.45±1.96
RL10	800	0.80±0.04
	900	3.61±0.34
	1000	3.60±0.44
RL11	800	0.40±0.02
	900	4.38±0.70
	1000	4.81±0.43
RL12	800	7.22±0.61
	900	9.00±0.39
	1000	18.39±0.63
RP13	800	0.73±0.05
	900	4.38±0.69
	1000	14.50±1.40
RL14	800	2.54±0.24
	900	2.50±0.30
	1000	5.76±0.66

ตารางที่ 4.14 ความต้านทานแรงอัดของชิ้นงานสูตรอิฐมวลเบากลุ่มที่ 3 เปรียบเทียบกับสูตรอิฐดินเผา (ต่อ)

สูตร	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความต้านทานแรงอัด (เมกะพาสคัล)
RL15F	800	0.69±0.09
	900	0.77±0.08
	1000	0.79±0.10
RL16F	800	0.58±0.19
	900	0.52±0.05
	1000	0.71±0.17
RL17F	800	0.34±0.07
	900	0.87±0.04
	1000	1.00±0.16

จากตารางที่ 4.14 และภาพที่ 4.13 แสดงความต้านทานแรงอัดของชิ้นงานสูตรอิฐมวลเบา กลุ่มที่ 3 สูตร RL9-RL14 และการเติมฟองโฟมในสูตร RL15F-RL17F เปรียบเทียบกับสูตรอิฐดินเผา พบว่าสูตร RL9-RL11 มีความต้านทานแรงอัดที่แปรผันตรงกับความหนาแน่นของชิ้นงาน จากสูตร RL9-RL11 ที่มีความหนาแน่นของชิ้นงานลดลงตามลำดับ ส่งผลให้ชิ้นงานมีความต้านทานแรงอัดลดลงตามเมื่อเทียบกับสูตรอิฐดินเผา เนื่องจากความพรุนตัวที่เกิดจากการเติมเถ้าหนักลิทไนต์เพิ่มขึ้น กับปูนปลาสเตอร์คงที่ ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ในสูตร RL12-RL14 มีการเติมเถ้าหนักลิทไนต์เพิ่มขึ้น แต่ลดปูนปลาสเตอร์ให้คงที่ ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ซึ่งความหนาแน่นของชิ้นงานจากทดสอบพบว่าสูตร RL12-RL14 มีความหนาแน่นที่สูงกว่าสูตร RL10-RL11 ความต้านทานแรงอัดของสูตร RL12-RL14 มีค่ามากกว่าสูตร RL10-RL11 ในขณะเดียวการเติมฟองโฟมในสูตร RL15F-RL17F ส่งผลต่อความหนาแน่นของชิ้นงานที่ลดลง ดังนั้นความต้านทานแรงอัดของชิ้นงานจึงลดลงตาม แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการเผาให้สูงขึ้น แนวโน้มความต้านทานแรงอัดของชิ้นงานทุกสูตรมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ เนื่องจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อการเกิดความหนาแน่นของชิ้นงานในกระบวนการเผาผนึกจากการเรียงตัวของอนุภาคให้มีการเรียงชิดกัน^[22] แต่อย่างไรก็ตาม การเพิ่มอุณหภูมิการเผาในสูตรที่มีการเติมฟองโฟมปริมาตร 1 ลิตร ในสูตร RL15F-RL17F มีผลทำให้ชิ้นงานมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นน้อยมาก



ภาพที่ 4.13 ความต้านทานแรงอัดของชิ้นงานสูตรอิฐดินเผาและสูตรอิฐมวลเบาในกลุ่มที่ 3

4.16 การนำความร้อนของชิ้นงานสูตรอิฐมวลเบาในกลุ่มที่ 3

จากการทดสอบการนำความร้อนของชิ้นงานเพื่อแสดงสมบัติความเป็นฉนวนกันความร้อนของชิ้นงาน เมื่อพิจารณาถึงการนำความร้อนของชิ้นงานสูตรอิฐดินเผาและสูตรอิฐมวลเบาในกลุ่มที่ 3 เปรียบเทียบกัน ดังแสดงในตารางที่ 4.15

ตารางที่ 4.15 การนำความร้อนของชิ้นงานสูตรอิฐมวลเบาในกลุ่มที่ 3 เปรียบเทียบกับสูตรอิฐดินเผา

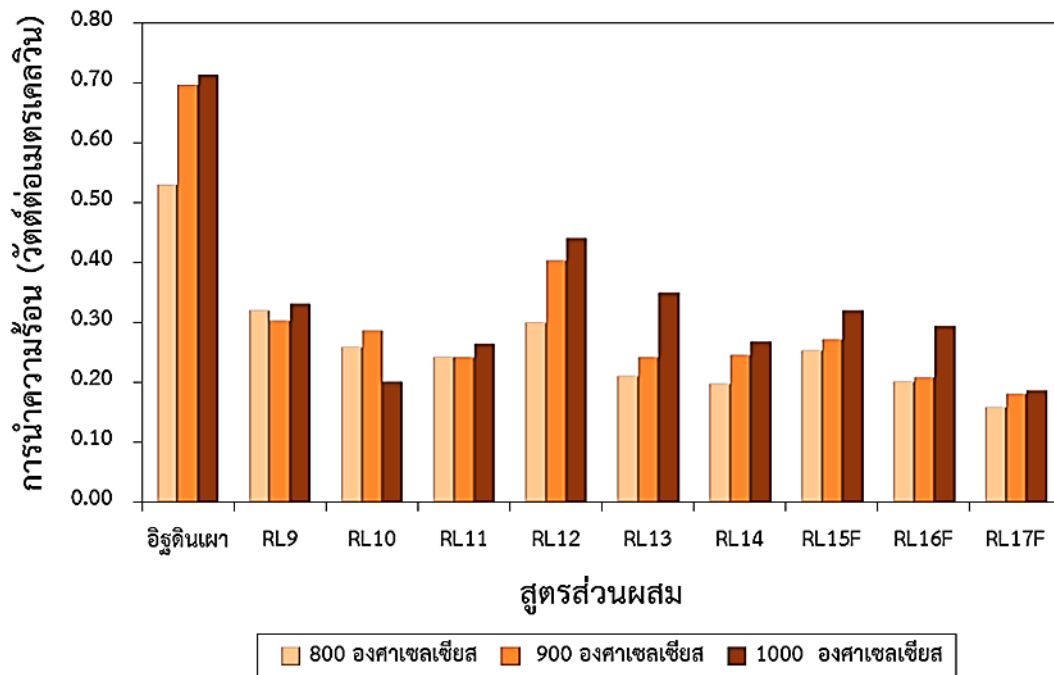
สูตร	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	การนำความร้อน (วัตต์ต่อเมตรเคลวิน)
อิฐดินเผา	800	0.530
	900	0.696
	1000	0.712
RL9	800	0.320
	900	0.305
	1000	0.331
RL10	800	0.260
	900	0.287
	1000	0.202
RL11	800	0.243
	900	0.243
	1000	0.265

ตารางที่ 4.15 การนำความร้อนของชิ้นงานสูตรอิฐมวลเบา กลุ่มที่ 3 เปรียบเทียบกับสูตรอิฐดินเผา (ต่อ)

สูตร	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	การนำความร้อน (วัตต์ต่อเมตรเคลวิน)
RL12	800	0.300
	900	0.405
	1000	0.441
RL13	800	0.320
	900	0.305
	1000	0.331
RL14	800	0.211
	900	0.243
	1000	0.350
RL15F	800	0.198
	900	0.246
	1000	0.269
RL16F	800	0.253
	900	0.273
	1000	0.320
RL17F	800	0.203
	900	0.209
	1000	0.294

จากตารางที่ 4.15 และภาพที่ 4.14 แสดงการทดสอบการนำความร้อนของชิ้นงาน หรือในทางกลับกัน การนำความร้อนสามารถบ่งบอกถึงสมบัติความเป็นฉนวนกันความร้อนของชิ้นงานได้ เมื่อชิ้นงานที่มีการนำความร้อนได้ต่ำจะมีสมบัติความเป็นฉนวนกันความร้อนที่สูง โดยชิ้นงานที่มีความพรุนตัวสูงหรือมีความหนาแน่นต่ำเป็นผลมาจากจำนวนรูพรุนที่มาก ที่มีอากาศถูกกักภายในรูพรุนกระจายอยู่ทั่วภายในชิ้นงาน เมื่อให้ความร้อนแก่ชิ้นงานที่มีความพรุนตัวสูง พบว่าการนำความร้อนจะลดลง เนื่องจากความร้อนมีการเดินทางผ่านตัวกลางที่เป็นอากาศเพิ่มขึ้น^[22, 23] ซึ่งในอิฐมวลเบาที่มีจำนวนรูพรุนที่มากจึงปรากฏสมบัติการเป็นฉนวนความร้อนในตัววัสดุ จากการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า สูตร RL15F-RL17F ที่มีการเติมฟองโฟม มีการนำความร้อนที่ต่ำและต่ำกว่าสูตรที่ไม่มีการเติม

ฟองโฟมอย่างสูตร RL12-RL14 และสูตรอิฐดินเผา และในขณะเดียวกันสูตรที่มีการเติมปูนปลาสเตอร์ ซึ่งมีความพรุนตัวที่สูง โดยเป็นความพรุนตัวที่เกิดจากโครงสร้างเจลเคลือบซีเมนต์เกิดจากการทำปฏิกิริยาของปูนปลาสเตอร์กับโซเดียมซิลิเกตในอัตราส่วน 1:1 ดังสมการที่ 1.1 ซึ่งสังเกตได้จากสูตร RL10-RL11 ที่มีการเติมปูนปลาสเตอร์มากถึง ร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก มีความพรุนตัวที่สูงกว่าอิฐดินเผา ทำให้มีความเป็นฉนวนกันความร้อนที่มากกว่าอิฐดินเผา ในอีกทางหนึ่ง พบว่าการเติมแก้วหนักกลไกไนต์แทนที่ดินราชบุรีจะส่งผลให้การนำความร้อนที่ลดลง ซึ่งส่งเสริมในเรื่องของความเป็นฉนวนกันความร้อนเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม ความพรุนตัวของชิ้นงานจะลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการเผา ซึ่งส่งผลให้ความหนาแน่นของชิ้นงานเพิ่มขึ้น ทำให้การนำความร้อนเพิ่มขึ้นตามหรือสมบัติความเป็นฉนวนกันความร้อนลดลง



ภาพที่ 4.14 การนำความร้อนของชิ้นงานสูตรอิฐดินเผาและสูตรอิฐมวลเบากลุ่มที่ 3

4.17 สีของชิ้นงานสูตรอิฐมวลเบากลุ่มที่ 3

จากผลการวิเคราะห์สีของชิ้นงานโดยวิเคราะห์เป็นค่า L^* และ b^* เมื่อพิจารณาสีของชิ้นงานสูตรอิฐดินเผาและสูตรอิฐมวลเบากลุ่มที่ 3 เปรียบเทียบกัน ดังแสดงในภาพที่ 4.15

ตารางที่ 4.16 ค่า L , a^* และ b^* ของชิ้นงานสูตรอิฐดินเผาและสูตรอิฐมวลเบาในกลุ่มที่ 3

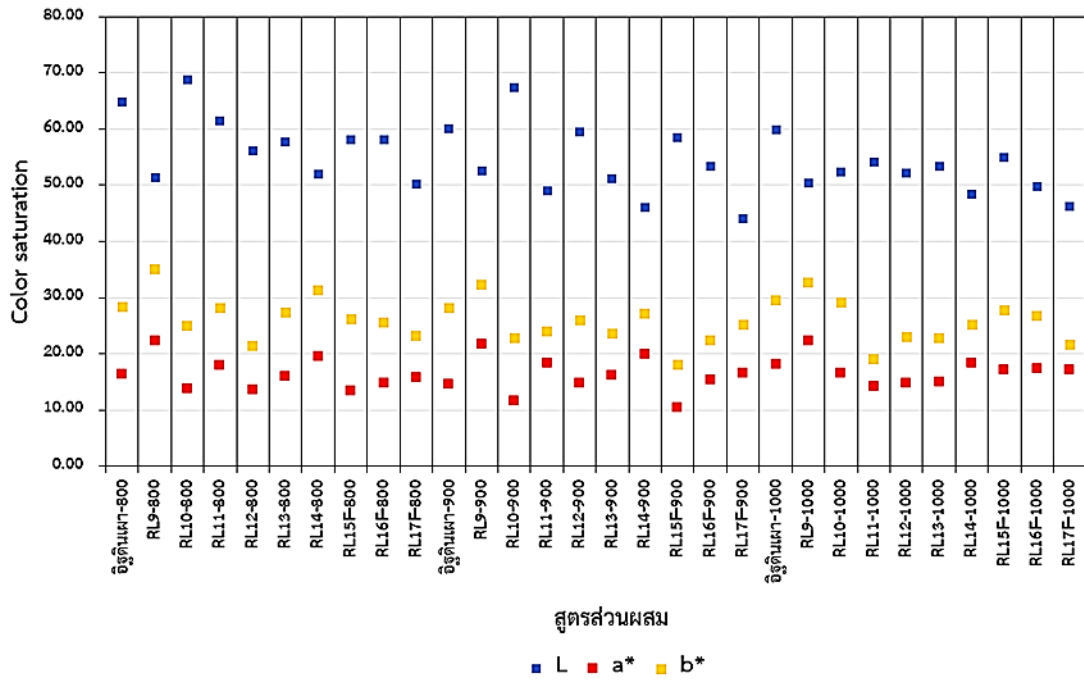
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	สูตร	L [n]	a^* , [ข]	b^* , [ค]
800	อิฐดินเผา	64.91	16.41	28.28
	RL9	51.33	22.22	35.10
	RL10	68.77	13.81	24.96
	RL11	61.52	17.92	28.15
	RL12	56.17	13.65	21.36
	RL13	57.72	15.94	27.36
	RL14	51.96	19.57	31.28
	RL15F	58.15	13.40	26.06
	RL16F	58.02	14.70	25.65
	RL17F	50.25	15.77	23.09
900	อิฐดินเผา	60.13	14.63	28.13
	RL9	52.65	21.65	32.37
	RL10	67.37	11.62	22.84
	RL11	49.00	18.39	24.04
	RL12	59.45	14.77	26.01
	RL13	51.20	16.22	23.65
	RL14	46.00	19.85	27.16
	RL15F	58.48	10.32	18.10
	RL16F	53.31	15.39	22.30
	RL17F	44.02	16.57	25.23
1000	อิฐดินเผา	59.86	18.22	29.46
	RL9	50.37	22.37	32.58
	RL10	52.46	16.65	29.19
	RL11	54.17	14.19	18.99
	RL12	52.23	14.83	22.89
	RL13	53.28	14.93	22.74
	RL14	48.35	18.29	25.17
	RL15F	54.91	17.11	27.81
	RL16F	49.71	17.43	26.73
	RL17F	46.18	17.13	21.64

หมายเหตุ [ก] ค่า L เป็นค่าที่แสดงความสว่างของชิ้นงาน ในช่วงค่า L เป็นบวกบ่งบอกว่าชิ้นงานมีความสว่าง และค่า L เป็นลบบ่งบอกว่าชิ้นงานมีความทึบ

[ข] ค่า a^* เป็นค่าที่แสดงสีของชิ้นงาน ในช่วงค่า a^* เป็นบวกบ่งบอกว่าชิ้นงานมีสีแดง และค่า a^* เป็นลบบ่งบอกว่าชิ้นงานมีสีเขียว

[ค] ค่า b^* เป็นค่าที่แสดงสีของชิ้นงาน ในช่วงค่า b^* เป็นบวกบ่งบอกว่าชิ้นงานมีสีเหลือง และค่า b^* เป็นลบบ่งบอกว่าชิ้นงานมีสีน้ำเงิน






















จากตารางที่ 4.16 และภาพที่ 4.15-4.16 พบว่าชิ้นงานหลังเผาของสูตรอิฐดินเผาจะมีสีส้มถึงสีส้มเข้มสังเกตได้จากค่าที่อยู่ในช่วง a^* และ b^* ที่แสดงในช่วงสีแดงกับสีเหลืองตามลำดับ และชิ้นงานมีสีส้มเข้มขึ้นเมื่อเผาชิ้นงานที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้น ตามการสุกตัวของดินราชบุรีที่เพิ่มตาม ในสูตร RL9-RL17F จะมีค่า a^* และ b^* ที่แสดงในช่วงสีแดงกับสีเหลืองตามลำดับเหมือนกัน แต่การเติมเถ้าหนักลิแกนด์แทนที่ดินราชบุรีในสูตร RL9 ส่งผลให้ชิ้นงานมีสีส้มเข้มกว่าเมื่อเทียบกับสูตรอิฐดินเผา แต่ในขณะเดียวกัน สูตร RL10-RL11 ที่มีการเติมเถ้าหนักลิแกนด์ที่เพิ่มขึ้น และเติมปูนปลาสเตอร์คงที่ร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก จะมีสีส้มที่อ่อนลงหรือมีความสว่างเพิ่มขึ้นเปรียบเทียบกับสีของอิฐดินเผา ประกอบกับสังเกตได้จากค่า L ที่เพิ่มขึ้น แต่สูตร RL11 พบว่าชิ้นงานมีสีน้ำตาล จากการเติมเถ้าหนักลิแกนด์ที่มากกว่าสูตร RL10 เห็นได้ชัดเมื่อเผาชิ้นงานที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้น ประกอบกับสังเกตได้จากค่า L ที่ลดลง เพราะว่าในเถ้าหนักลิแกนด์เมื่อถึงจุดสุกตัว เพอริกออกไซด์จะอยู่ในรูปของฮีมาไทต์ส่งผลให้ชิ้นงานมีสีน้ำตาล ในสูตร RL12-RL14 ที่มีการลดปริมาณของปูนปลาสเตอร์ลง กำหนดให้คงที่เป็นร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ทำให้ชิ้นงานหลังเผามีสีที่เข้มขึ้นเมื่อน้อยกว่าสูตร RL10-RL11 สีของชิ้นงานจะแสดงในช่วงของสีส้มเข้มจนถึงสีน้ำตาล ขึ้นกับปริมาณของเถ้าหนักลิแกนด์ที่เติมเพิ่มขึ้น และสีของชิ้นงานสูตร RL12-RL14 จะมีสีที่เข้มขึ้นเมื่ออุณหภูมิการเผาเพิ่มขึ้น โดยสังเกตได้จากค่า L ที่ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับสีของอิฐดินเผา แต่แนวโน้มสีชิ้นงานของสูตรที่มีการเติมฟองโพนในสูตร RL15F-RL17F ชิ้นงานจะมีสีน้ำตาลที่เข้มทึบ เนื่องจากเพอริกออกไซด์อยู่ในรูปของแมกนีไทต์ ซึ่งผลจากการเติมฟองโพนส่งผลให้ชิ้นงานมีความพรุนตัวสูง ความร้อนจากการเผาสามารถสัมผัสกับพื้นผิวของชิ้นงานได้มากขึ้น การสุกตัวจึงเกิดขึ้นได้เร็วทำให้ชิ้นงานหลังเผาจึงมีสีส้มที่ทึบหรือเข้มขึ้น และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการเผาเพิ่มขึ้นในสูตร RL15F-RL17F จะสีที่เข้มและทึบเพิ่มขึ้นจากเดิมเมื่อเปรียบเทียบกับอิฐดินเผาและสูตรที่ไม่มีการเติมฟองโพน



ภาพที่ 4.15 สีของชิ้นงานสูตรอีฐดินเผาและสูตรอีฐมวลเบาในกลุ่มที่ 3

สูตรส่วนผสม	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)		
	800	900	1000
อีฐดินเผา			
RL9			
RL10			

ภาพที่ 4.16 ชิ้นงานสูตรอีฐดินเผาและสูตรอีฐมวลเบาในกลุ่มที่ 3

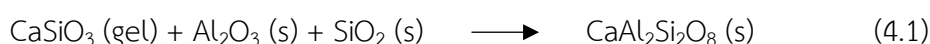
สูตรส่วนผสม	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)		
	800	900	1000
RL11			
RL12			
RL13			
RL14			
RL15F			
RL16F			
RL17F			

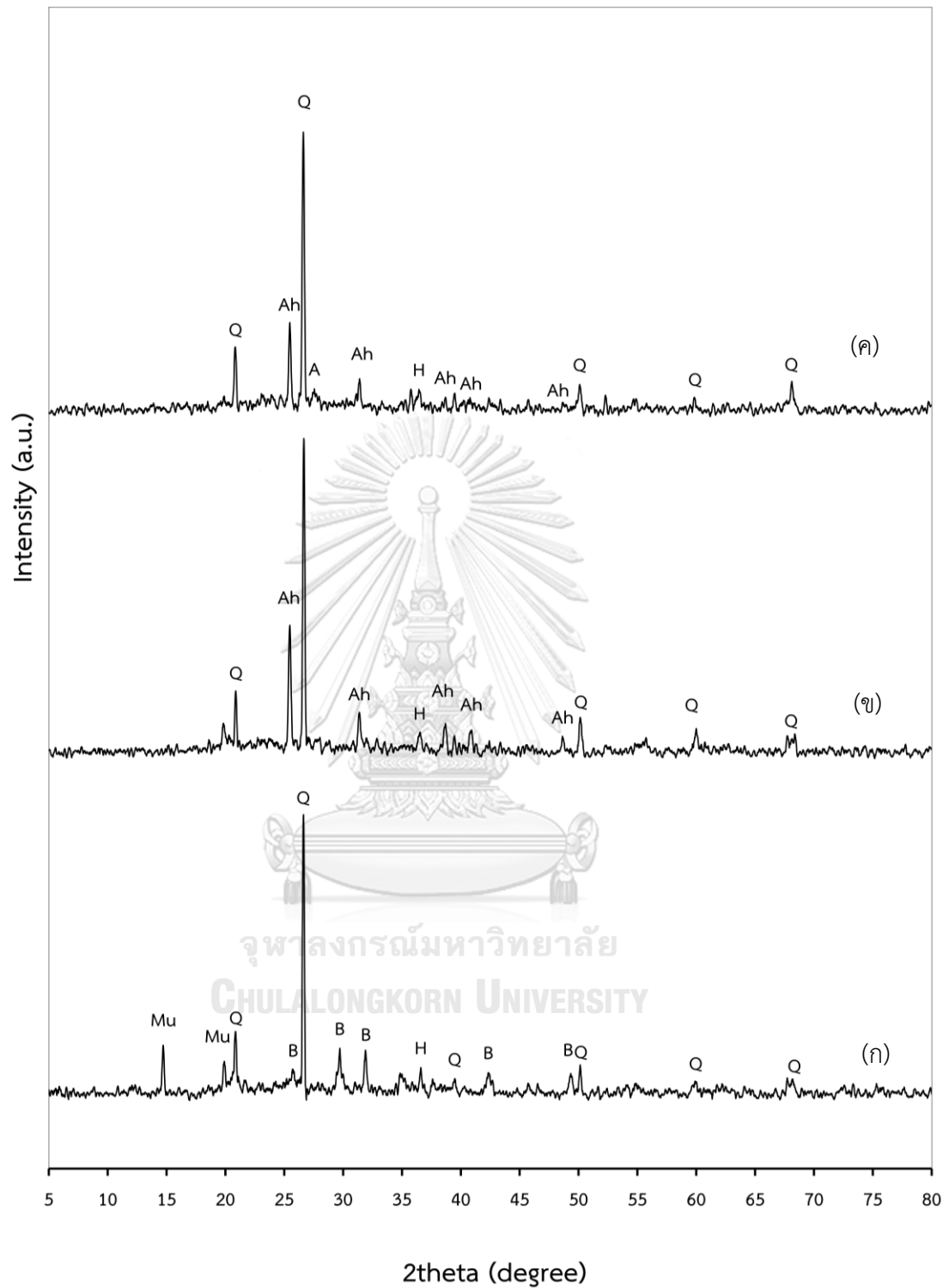
ภาพที่ 4.16 ชิ้นงานสูตรอิฐดินเผาและสูตรอิฐมวลเบา กลุ่มที่ 3 (ต่อ)

4.18 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสของสูตร RL12 และสูตร RL14

การวิเคราะห์นี้ได้เลือกจากสูตรอิฐมวลเบากลุ่มที่ 3 สูตร RL12 และ RL14 ที่มีองค์ประกอบของเถ้าหนักลิแกนด์แทนที่ดินราชบุรี ร้อยละ 20 และ 60 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ และปูนปลาสเตอร์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ทำปฏิกิริยากับโซเดียมซิลิเกตในอัตราส่วน 1:1 โดยทำการวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction) ของทั้ง 2 สูตร ได้แก่วัสดุก่อนเผา ใช้งานหลังเผาที่อุณหภูมิ 800 และ 1000 องศาเซลเซียส ดังแสดงในภาพที่ 4.17-4.18

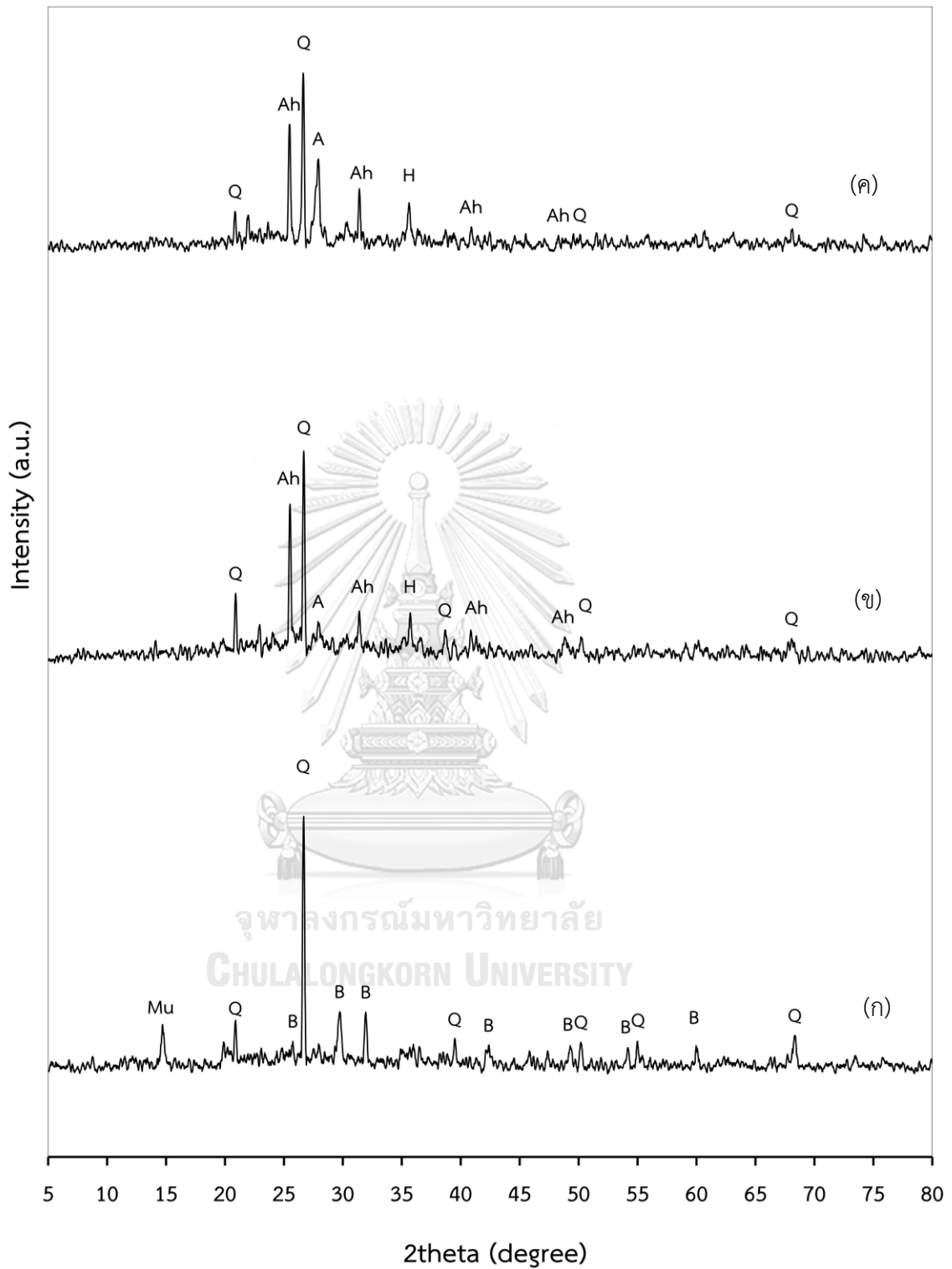
จากภาพที่ 4.17-4.18 (ก) แสดงการวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสของชิ้นงานก่อนเผา สังเกตได้ว่าในสูตร RL12 มีปรากฏฟีกของควอตซ์ (SiO_2) เป็นเฟสที่พบได้ในดินราชบุรีและเถ้าหนักลิแกนด์ ฟีกของมัสโคไวต์ ($\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{AlO}_{10})(\text{OH})_2$) ซึ่งเป็นเฟสที่พบในดินราชบุรี และฟีกของบาชานิต ($\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$) เป็นเฟสที่พบในปูนปลาสเตอร์อบแห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส ในขณะที่สูตร RL14 ที่มีการเติมเถ้าหนักลิแกนด์เพิ่มขึ้นจะมีปรากฏฟีกของควอตซ์ลดลงตามสัดส่วนของดินราชบุรีที่ลดลง ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส พบว่าฟีกของมัสโคไวต์ลดลงและไม่ปรากฏที่อุณหภูมิการเผาที่สูงขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 4.17-4.18 (ข) อีกทั้งฟีกของแอนไฮไดรต์ (CaSO_4) ที่ปรากฏขึ้นหลังเผาซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนเฟสของบาชานิต ส่วนโครงสร้างเจลของแคลเซียมซิลิเกต (CaSiO_3) ที่เกิดขึ้นจากสมการที่ 1.1^[5] และโซเดียมซิลิเกตที่หลอมเป็นเฟสแก้วเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นนั้น จะไม่ปรากฏฟีกในการวิเคราะห์หรือไม่สามารถตรวจจับสัญญาณได้เนื่องจากอยู่ในรูปของอสัณฐาน แต่บ่งบอกได้ว่าปฏิกิริยาการเกิดโครงสร้างเจลมีการเกิดขึ้นจากการสังเกตการลดลงของฟีกแอนไฮไดรต์ ในการวิเคราะห์องค์ประกอบเฟส สังเกตได้ว่าฟีกหลักของควอตซ์ในสูตร RL12 ที่มีความสูงของฟีกลดลงอย่างช้าและต่อเนื่องจนถึงอุณหภูมิที่ 1000 องศาเซลเซียส แต่ในขณะเดียวกันฟีกของควอตซ์ในสูตร RL14 มีความสูงลดลงและต่อเนื่องมากกว่าสูตร RL12 ซึ่งเป็นผลมาจากสัดส่วนของดินราชบุรีที่ลดลง ดังแสดงในภาพที่ 4.17-4.18 (ค) จากการเพิ่มอุณหภูมิ 800 เป็น 1000 องศาเซลเซียส พบได้ว่าฟีกของอะนอร์ไทต์ ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) มีความสูงเพิ่มขึ้นมา โดยสังเกตได้ชัดในสูตร RL14 ที่มีการเติมเถ้าหนักลิแกนด์เพิ่มขึ้น ชิ้นงานเริ่มมีการสุกตัวที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้น อีกทั้งเมื่ออุณหภูมิการเผาสูงขึ้นแคลเซียมซิลิเกตสามารถทำปฏิกิริยากับอะลูมินา (Al_2O_3) และซิลิกา (SiO_2) ในเถ้าหนักลิแกนด์และดินราชบุรีเกิดเป็นอะนอร์ไทต์เกิดขึ้น^[50] ดังสมการที่ 4.1





ภาพที่ 4.17 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสของสูตร RL12 ประกอบด้วย (ก) ขึ้นงานก่อนเผา (ข) 800 องศาเซลเซียส และ (ค) 1000 องศาเซลเซียส

(A = Anorthite, B = Basanite, Ah = Anhydrite, H = Hematite, Mu = Muscovite และ Q = Quartz)



ภาพที่ 4.18 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสของสูตร RL14 ประกอบด้วย (ก) ขึ้นงานก่อนเผา

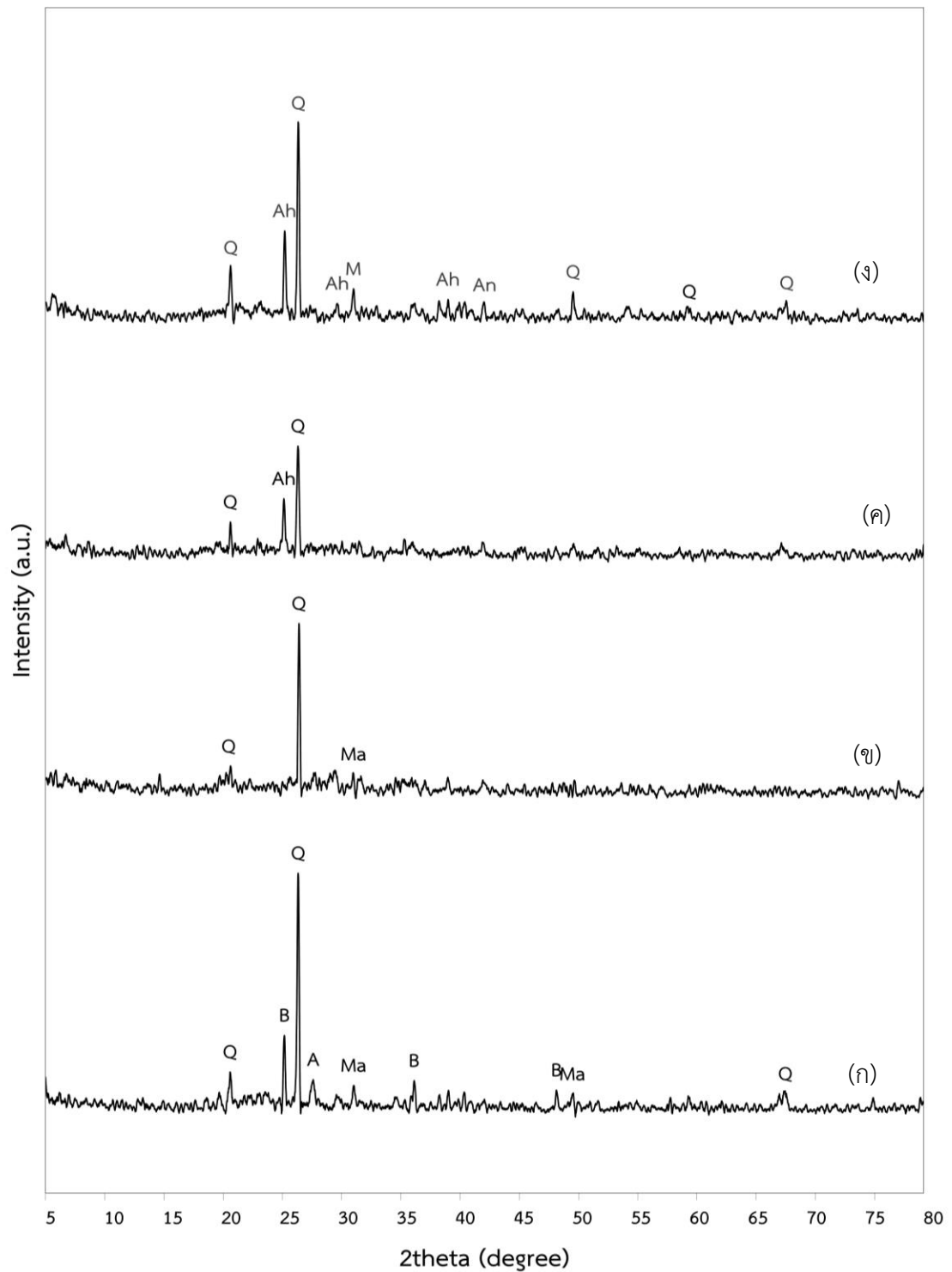
(ข) 800 องศาเซลเซียส และ (ค) 1000 องศาเซลเซียส

(A = Anorthite, B = Basanite, Ah = Anhydrite, Mu = Muscovite และ Q = Quartz)

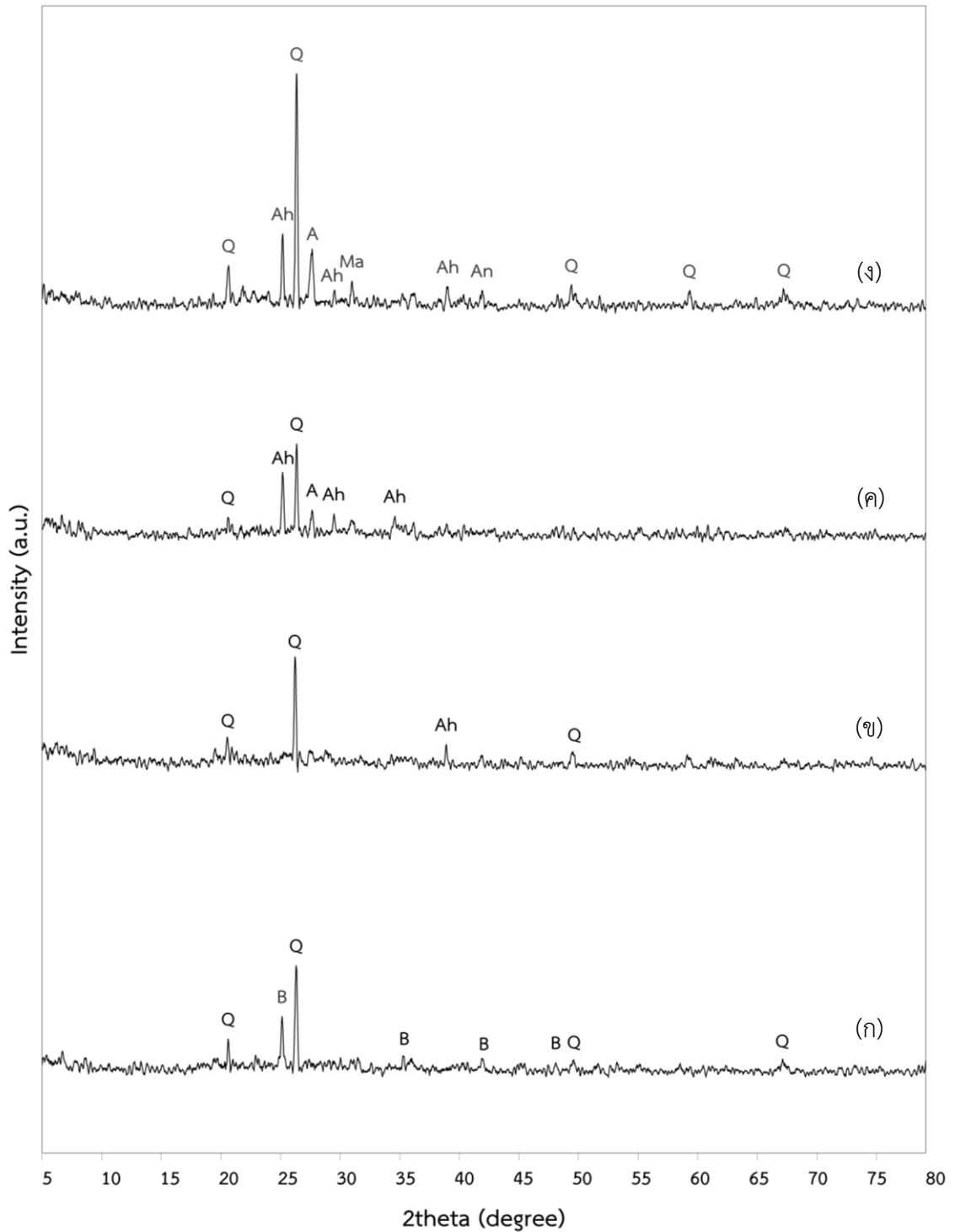
4.19 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสของสูตร RL15F และสูตร RL17F

การวิเคราะห์นี้ได้เลือกจากสูตรอิฐมวลเบากลุ่มที่ 3 สูตร RL15F และ RL17F ที่มีองค์ประกอบของเถ้าหนักลิกลินไนด์แทนที่ดินราชบุรี ร้อยละ 20 และ 60 โดยน้ำหนัก ตามลำดับเติมฟองโฟมปริมาตร 1 ลิตร และเติมปูนปลาสเตอร์คงที่ ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ทำปฏิกิริยากับโซเดียมซิลิเกตในอัตราส่วน 1:1 โดยทำการวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction) ของทั้ง 2 สูตร โดยทำการวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction) โดยทำการวิเคราะห์ตัวอย่างของทั้ง 2 สูตร ได้แก่ ชิ้นงานก่อนเผา ชิ้นงานหลังเผาที่อุณหภูมิ 800 900 และ 1000 องศาเซลเซียส ดังแสดงในภาพที่ 4.19-4.20

จากภาพที่ 4.19-4.20 (ก) แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสของชิ้นงานก่อนเผาสูตรที่มีการเติมฟองโฟม สังเกตได้ว่าในสูตร RL15F มีปรากฏฟิสิกของควอตซ์ (SiO_2) เป็นเฟสที่พบในดินราชบุรีและเถ้าหนักลิกลินไนด์ ประกอบกับปรากฏฟิสิกของอะนอร์ไทต์ ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) และฟิสิกของแมกนีไทต์ (Fe_3O_4) จากเฟสที่พบในเถ้าหนักลิกลินไนด์ และปรากฏฟิสิกของบาซาไนต์ ($\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$) เป็นเฟสที่พบในปูนปลาสเตอร์อบแห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส ในขณะที่สูตร RL17F ที่มีการเติมเถ้าหนักลิกลินไนด์มากกว่าสูตร RL15F จะปรากฏฟิสิกของอะนอร์ไทต์ที่สังเกตได้ชัดเมื่ออุณหภูมิการเผาเพิ่มขึ้น อีกทั้งฟิสิกของแอนไฮไดรต์ (CaSO_4) ที่ปรากฏขึ้นหลังเผาซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนเฟสของบาซาไนต์เช่นเดียวกับสูตร RL12 และ RL14 ในขณะเดียวกันโครงสร้างเจลแคลเซียมซิลิเกตที่เกิดขึ้นประกอบกับโซเดียมซิลิเกตที่หลอมตัวเป็นเฟสแก้วที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นนั้น ไม่ปรากฏฟิสิกในการวิเคราะห์หรือไม่สามารถตรวจจับสัญญาณได้ เนื่องจากอยู่ในรูปของอสัณฐาน แต่บ่งบอกได้ว่ามีปฏิกิริยาการเกิดโครงสร้างเจลเกิดขึ้นสังเกตได้จากการลดลงของฟิสิกแอนไฮไดรต์ จากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นในช่วง 800-1000 องศาเซลเซียส พบได้ว่าในสูตร RL15F ที่มีความสูงของฟิสิกควอตซ์ลดลงอย่างช้าและต่อเนื่องจนถึงอุณหภูมิที่ 900 องศาเซลเซียส ดังแสดงในภาพที่ 4.19-4.20 (ข-ค) แต่ในขณะเดียวกันฟิสิกของควอตซ์ในสูตร RL17F มีความสูงลดลงและต่อเนื่องมากกว่าสูตร RL15F ดังแสดงในภาพที่ 4.19-4.20 ซึ่งเป็นผลมาจากสัดส่วนของดินราชบุรีที่ลดลง ในขณะเดียวกันเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการเผาเป็น 1000 องศาเซลเซียส พบว่าในสูตร RL15F และ RL17F มีความสูงของฟิสิกควอตซ์จากที่ลดลงอย่างช้าและต่อเนื่องนั้นกลับมีฟิสิกที่สูงเพิ่มขึ้นดังแสดงในภาพที่ 4.19-4.20 (ง) เนื่องจากการสุกตัวของเถ้าหนักลิกลินไนด์ และในสูตร RL17F มีปรากฏฟิสิกของอะนอร์ไทต์ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นไปตามปฏิกิริยาในสมการที่ 4.1^[50] ผลจากการเติมฟองโฟมส่งผลให้ชิ้นงานมีความพรุนตัวสูง ความร้อนจากการเผาสามารถสัมผัสกับพื้นผิวของชิ้นงานได้มากขึ้น การสุกตัวจึงเกิดขึ้นได้เร็วจึงปรากฏฟิสิกของแมกนีไทต์ที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้น^[41, 42]



ภาพที่ 4.19 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสของสูตร RL15F ประกอบด้วย (ก) ขึ้นงานก่อนเผา (ข) 800 องศาเซลเซียส (ค) 900 องศาเซลเซียส และ (ง) 1000 องศาเซลเซียส
(A = Anorthite, Ah = Anhydrite, B = Basanite, Ma = Magnetite และ Q = Quartz)

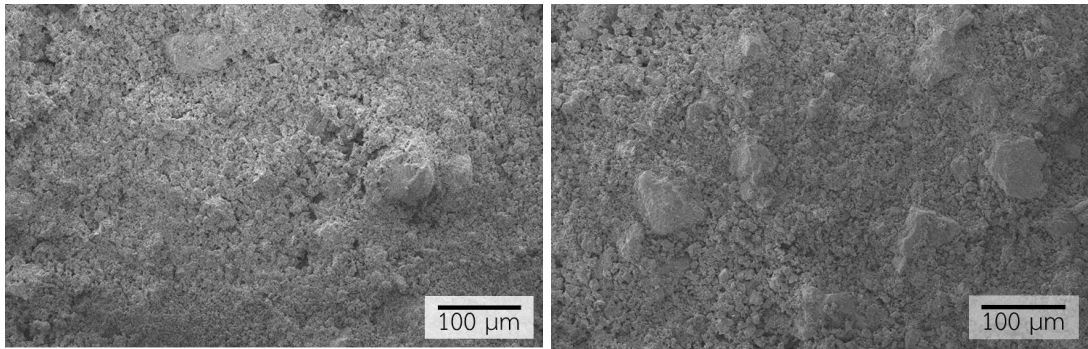


ภาพที่ 4.20 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสของสูตร RL17F ประกอบด้วย (ก) ชั้่นงานก่อนเผา (ข) 800 องศาเซลเซียส (ค) 900 องศาเซลเซียส และ (ง) 1000 องศาเซลเซียส (A = Anorthite, Ah = Anhydrite, B = Basanite, Ma = Magnetite และ Q = Quartz)

4.20 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของสูตร RL12 และสูตร RL14

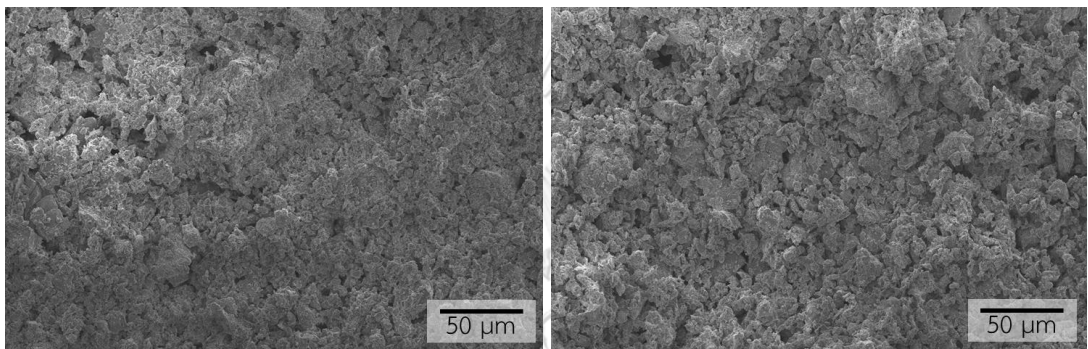
การวิเคราะห์นี้ได้เลือกจากสูตรอิฐมวลเบากลุ่มที่ 3 สูตร RL12 และ RL14 ที่มีองค์ประกอบของเส้นใยลิกไนต์แทนที่ดินราชบุรี ร้อยละ 20 และ 60 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ และปูนปลาสเตอร์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ทำปฏิกิริยากับโซเดียมซิลิเกตในอัตราส่วน 1:1 โดยทำการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของตัวอย่างทั้ง 2 สูตร เปรียบเทียบกัน ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ได้แก่ ชิ้นงานก่อนเผา ชิ้นงานหลังเผาที่อุณหภูมิ 800 900 และ 1000 องศาเซลเซียส ดังแสดงในภาพที่ 4.21-4.24 ตามลำดับ ที่กำลังขยาย 200X 500X และ 2000X

จากภาพที่ 4.24 เมื่อเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคบริเวณภายในของชิ้นงานก่อนเผาทั้ง 2 สูตร ซึ่งเป็นโครงสร้างที่มีความพรุนตัวจากการเกิดโครงสร้างเจลของแคลเซียมซิลิเกตและการเติมเส้นใยลิกไนต์ สังเกตได้จากภาพที่ 4.21 (ก-ข) ที่กำลังขยาย 200X ชิ้นงานมีความพรุนตัวแตกต่างกันไม่มาก แต่ที่กำลังขยาย 500X จากภาพที่ 4.21 (ค-ง) สังเกตได้ว่าชิ้นงานของสูตร RL14 มีความพรุนตัวเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับสูตร RL12 เนื่องจากการเติมเส้นใยลิกไนต์เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 20 เป็นร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการเผาเป็น 800 องศาเซลเซียส จากภาพที่ 4.22 ความพรุนตัวของชิ้นงานทั้งสองลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานก่อนเผา และจากภาพที่ 4.23-4.24 แนวโน้มความพรุนตัวมีการลดลงอย่างต่อเนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิเป็น 900 และ 1000 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ด้วยอุณหภูมิที่สูงขึ้นส่งผลต่อการเพิ่มความหนาแน่นในกระบวนการเผาผนึกที่เพิ่มขึ้น แต่สูตร RL14 ยังคงมีความพรุนตัวที่สูงกว่าสูตร RL12 สังเกตเห็นได้ชัดที่กำลังขยาย 2000X ในภาพที่ 4.21-4.24 (จ-ฉ) จากการมีเส้นใยลิกไนต์ในสูตรที่มากกว่าและมีสัดส่วนของดินราชบุรีลดลงส่งผลให้การสุกตัวเกิดขึ้นได้ช้า ซึ่งสอดคล้องกับสมบัติทางกายภาพของสูตร RL12 ที่มีความหนาแน่นและความต้านทานแรงอัดมากกว่าสูตร RL14



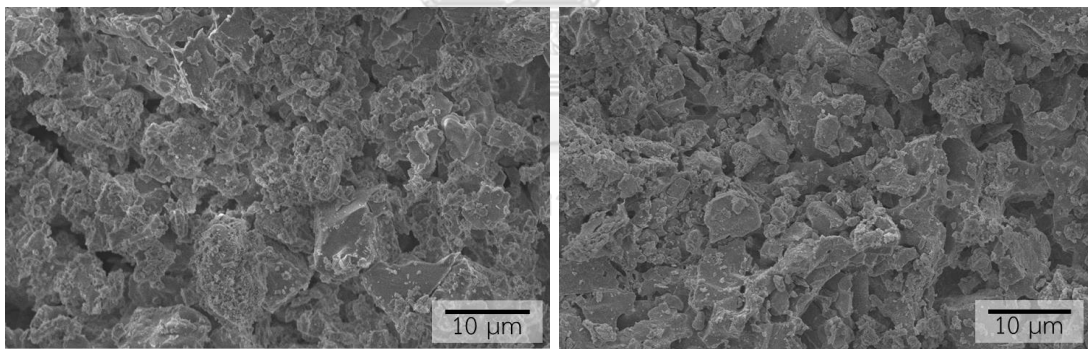
(ก) 200X

(ข) 200X



(ค) 500X

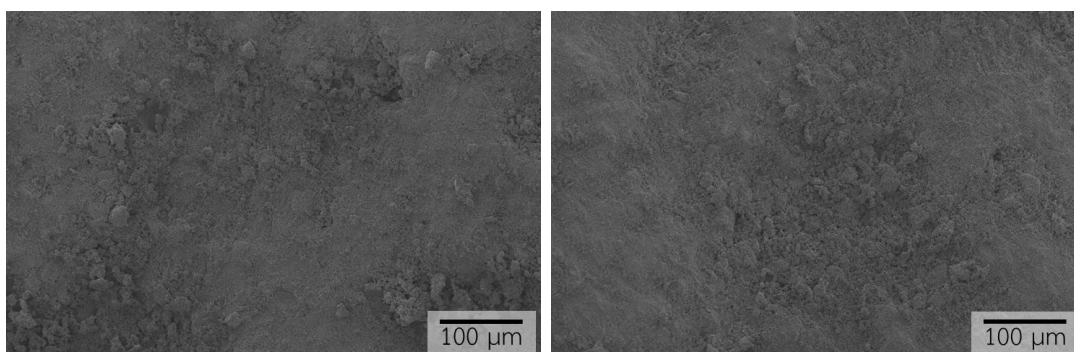
(ง) 500X



(จ) 2000X

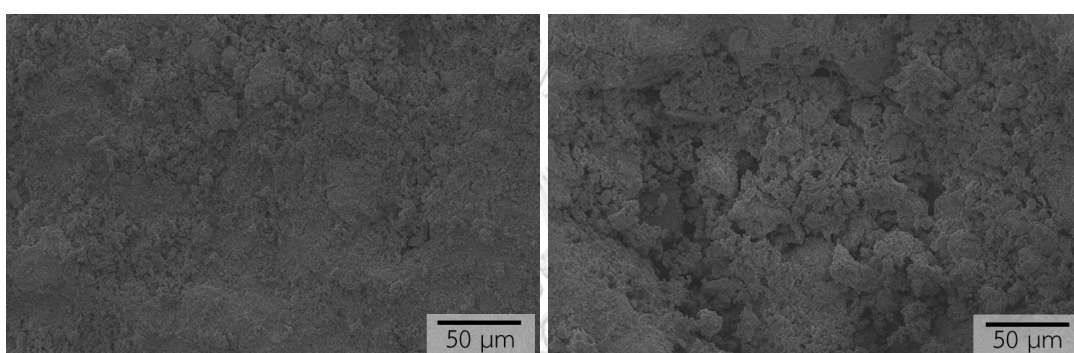
(ฉ) 2000X

ภาพที่ 4.21 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานก่อนเผาของสูตร RL12 (ก, ค และ จ) และสูตร RL14 (ข, ง และ ฉ)



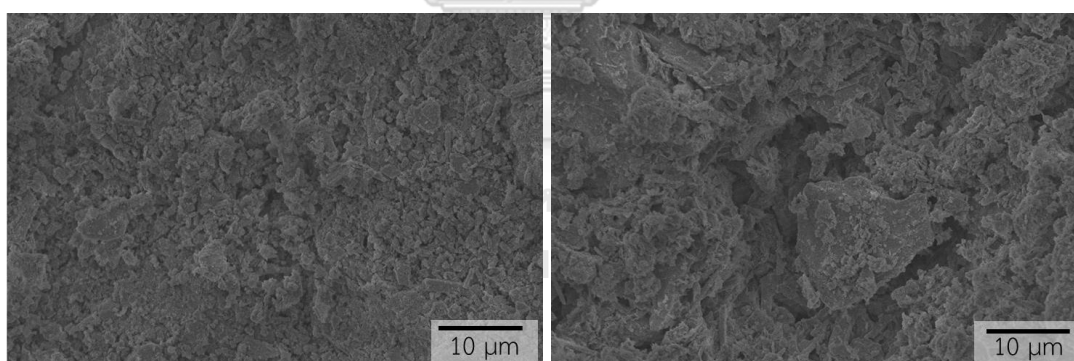
(ก) 200X

(ข) 200X



(ค) 500X

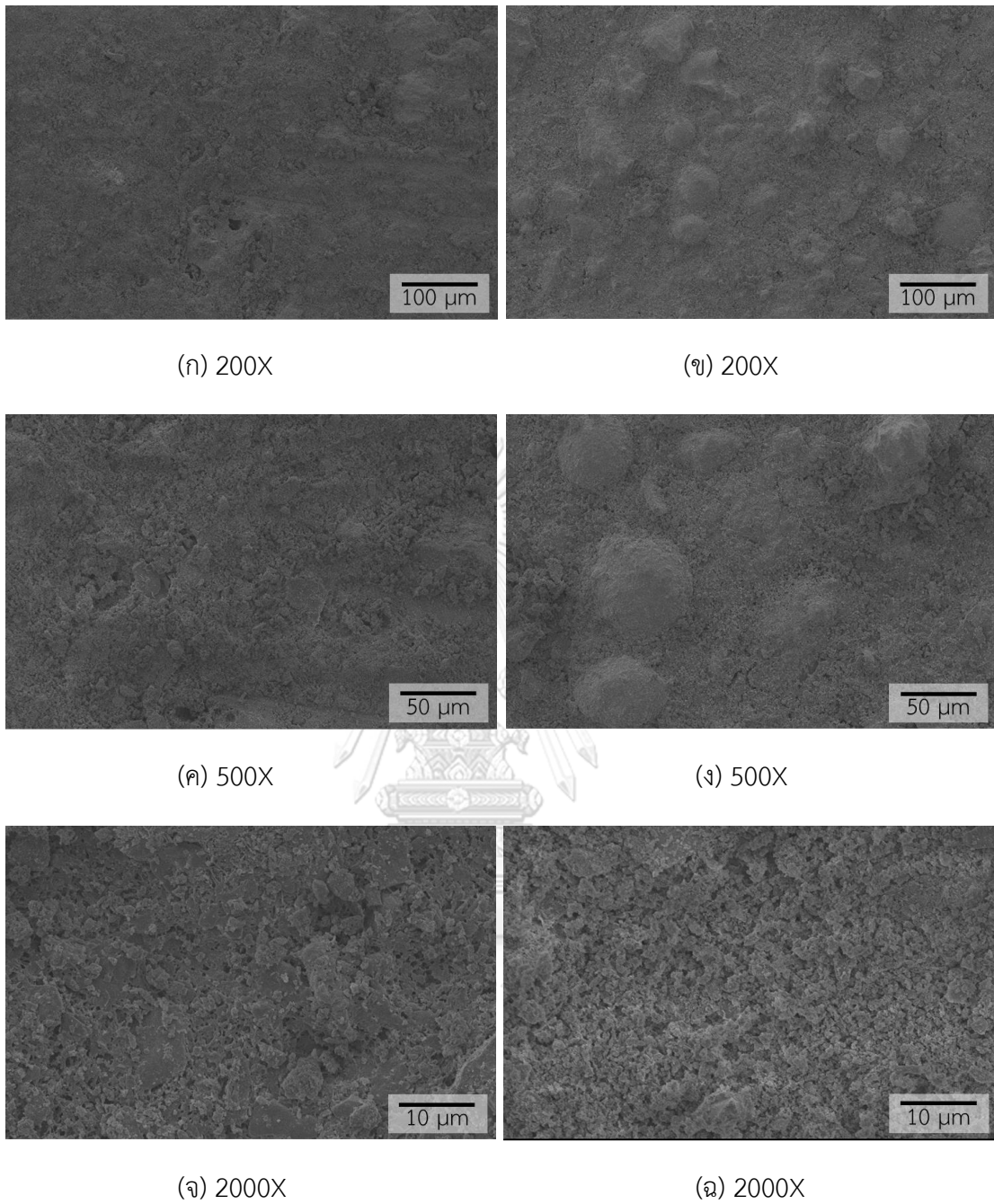
(ง) 500X



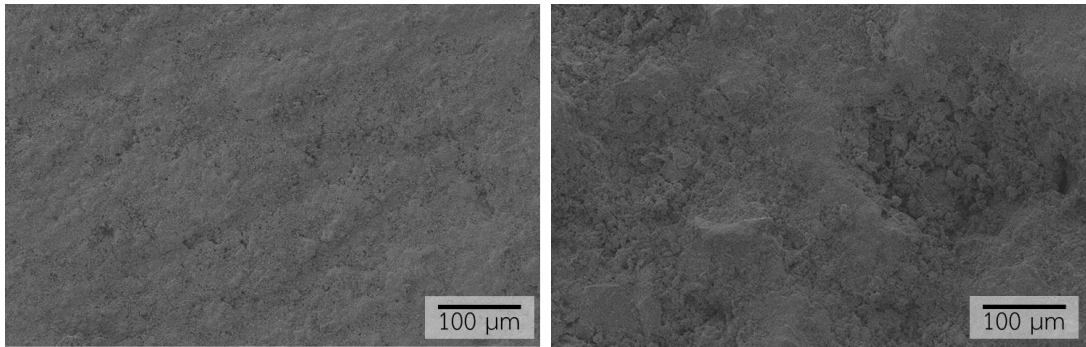
(จ) 2000X

(ฉ) 2000X

ภาพที่ 4.22 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ของสูตร RL12
(ก, ค และ จ) และสูตร RL14 (ข, ง และ ฉ)

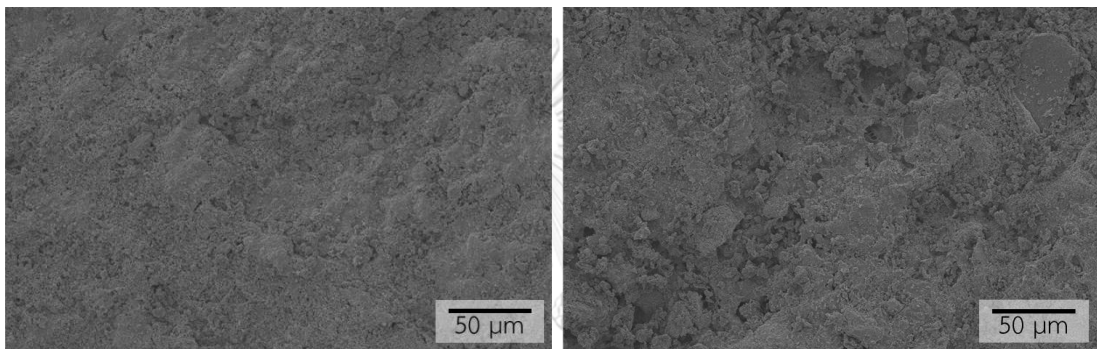


ภาพที่ 4.23 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ของสูตร RL12 (ก, ค และ จ) และสูตร RL14 (ข, ง และ ฉ)



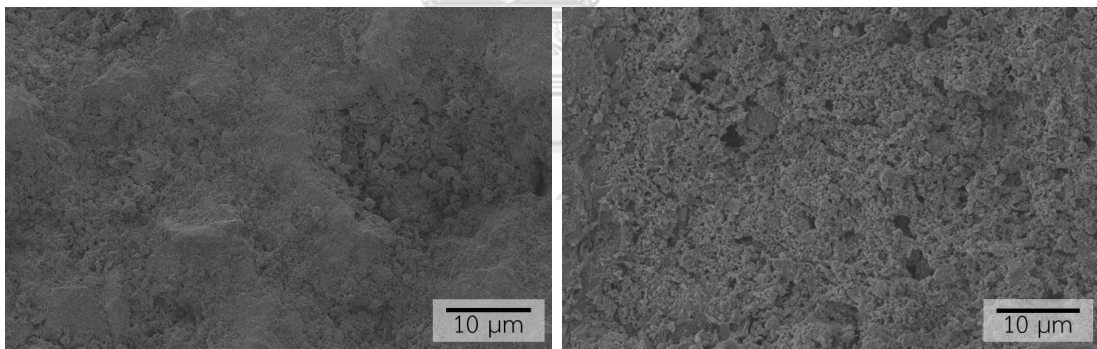
(ก) 200X

(ข) 200X



(ค) 500X

(ง) 500X



(จ) 2000X

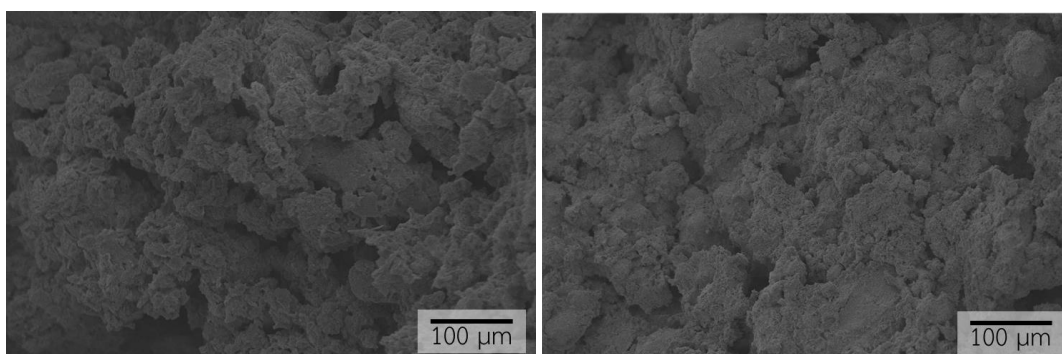
(ฉ) 2000X

ภาพที่ 4.24 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส ของสูตร RL12 (ก, ค และ จ) และสูตร RL14 (ข, ง และ ฉ)

4.21 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของสูตร RL15F และสูตร RL17F

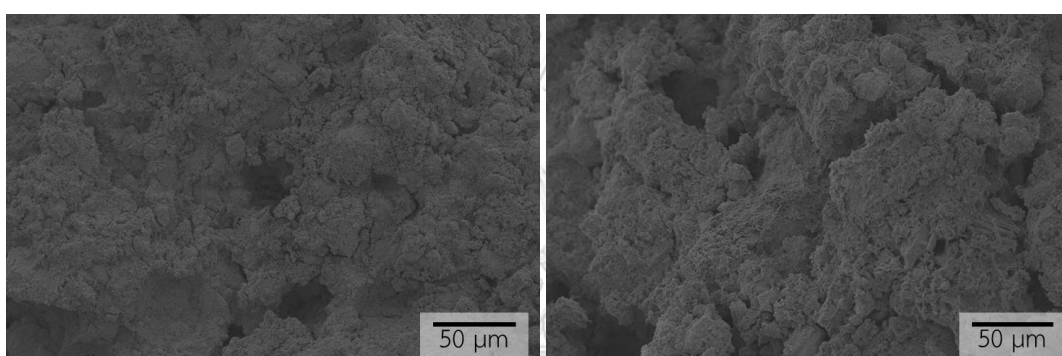
การวิเคราะห์นี้ได้เลือกจากสูตรอิฐมวลเบากลุ่มที่ 3 สูตร RL15F และ RL17F ที่มีองค์ประกอบของเถ้าหนักลิแกไนต์แทนที่ดินราชบุรี ร้อยละ 20 และ 60 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ประกอบกับการเติมฟองโฟมปริมาตร 1 ลิตร และปูนปลาสเตอร์ ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ที่ทำปฏิกิริยากับโซเดียมซิลิเกตในอัตราส่วน 1:1 โดยทั้ง 2 สูตร ที่มีการเติมฟองโฟมจะมีสมบัติทางกายภาพที่แตกต่างกันและมีสมบัติทางกายภาพที่ยังต่างออกไปจากสูตร RL12 และ RL14 อีกด้วย โดยทำการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่งกราด (SEM) ได้แก่ ชิ้นงานก่อนเผา ชิ้นงานหลังเผาที่อุณหภูมิ 800 900 และ 1000 องศาเซลเซียส ดังแสดงในภาพที่ 4.25-4.28 ตามลำดับ ที่กำลังขยาย 200X 500X และ 2000X

จากภาพที่ 4.28 เมื่อเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคบริเวณภายในของชิ้นงานก่อนเผาทั้ง 2 สูตร ซึ่งภายในชิ้นงานมีรูพรุนจากการเติมฟองโฟม ประกอบกับการเกิดโครงสร้างเจลของแคลเซียมซิลิเกต ส่งผลให้ชิ้นงานในสูตรทั้ง 2 ข้างต้น มีความพรุนตัวมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับสูตร RL12 และ RL14 ซึ่งสังเกตได้จากภาพที่ 4.25 (ก-ข) ที่กำลังขยาย 200X สังเกตได้ว่ารูพรุนมีการกระจายอยู่ภายในชิ้นงาน และความพรุนตัวเมื่อเปรียบเทียบระหว่างทั้งสองสูตร พบว่าสูตร RL17F มีความพรุนตัวที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเติมเถ้าหนักลิแกไนต์ที่เพิ่มขึ้น ดังภาพที่ 4.25 (จ) ที่กำลังขยาย 2000X อีกทั้งยังปรากฏรูปลูกของบาศาไนต์ที่ลักษณะเป็นแท่งกระจายตัวอยู่ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการเผาเพิ่มขึ้นเป็น 800 องศาเซลเซียส จะเห็นได้ว่าชิ้นงานมีความพรุนตัวที่ลดลง สังเกตได้จากภาพที่ 4.26 ที่มีความพรุนตัวลดลงเมื่อเทียบกับชิ้นงานก่อนเผา และแนวโน้มความพรุนตัว จากภาพที่ 4.27-4.28 มีการลดลงอย่างต่อเนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิเป็น 900 และ 1000 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ด้วยที่อุณหภูมิสูงขึ้นส่งผลต่อการเพิ่มความหนาแน่นในกระบวนการเผาผนึกที่เพิ่มขึ้น แต่สูตร RL17F ยังคงมีความพรุนตัวที่สูงกว่าสูตร RL15F เนื่องจากการมีเถ้าหนักลิแกไนต์ในสูตรมากกว่า ซึ่งสอดคล้องกับสมบัติทางกายภาพที่สูตร RL15F ที่มีความหนาแน่นและความต้านทานแรงอัดมากกว่าสูตร RL17F แต่อย่างไรก็ตาม การเติมฟองโฟมของทั้ง 2 สูตร มีผลต่อการเพิ่มความพรุนตัวในชิ้นงานอย่างมีนัยสำคัญ ส่งผลให้มีความหนาแน่นที่ลดลงและความต้านทานแรงอัดที่ต่ำลง เมื่อเปรียบเทียบกับสูตรที่ไม่มีการเติมฟองโฟมในสูตร RL12 และ RL14



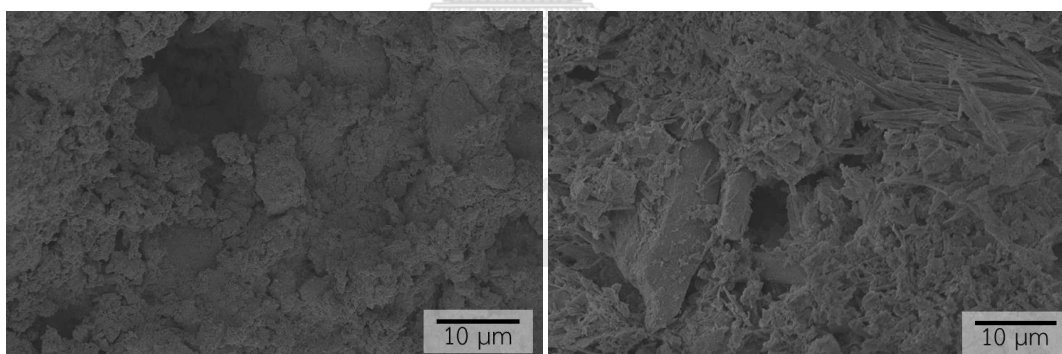
(ก) 200X

(ข) 200X



(ค) 500X

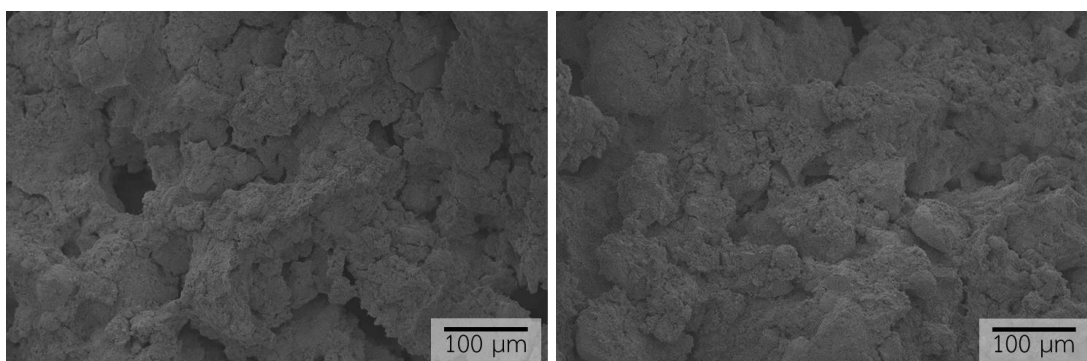
(ง) 500X



(จ) 2000X

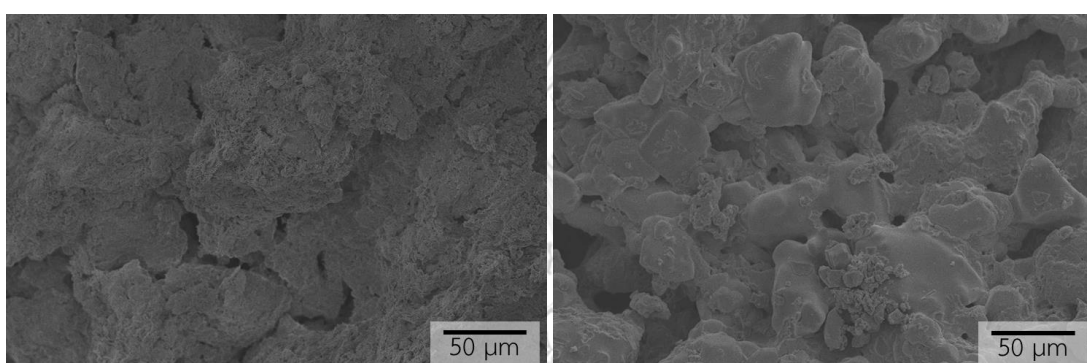
(ฉ) 2000X

ภาพที่ 4.25 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานก่อนเผาของสูตร RL15F (ก, ค และ จ) และสูตร RL17F (ข, ง และ ฉ)



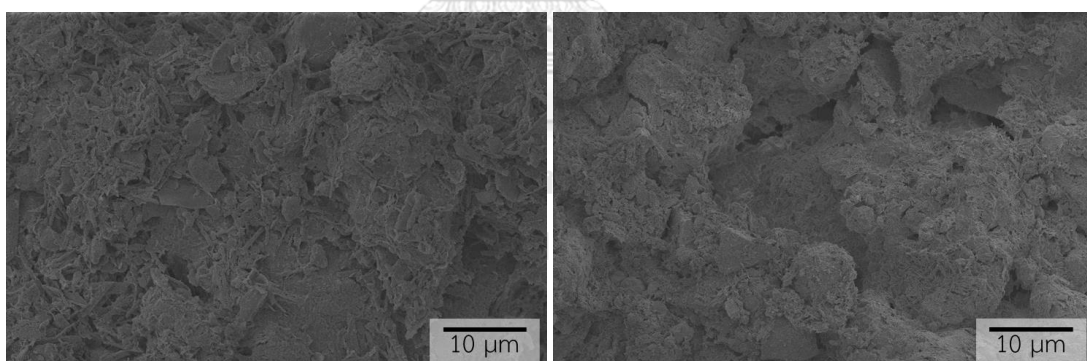
(ก) 200X

(ข) 200X



(ค) 500X

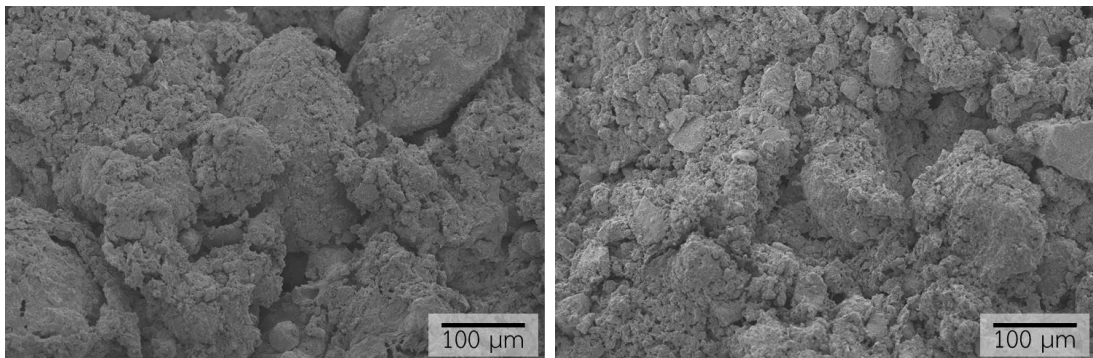
(ง) 500X



(จ) 2000X

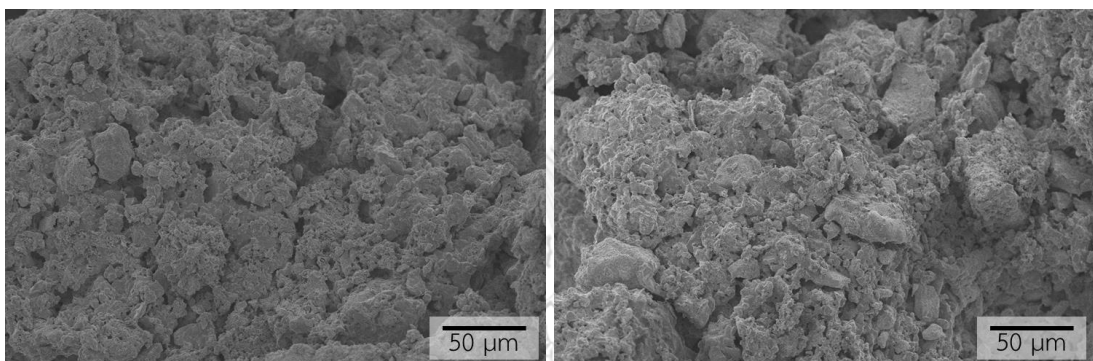
(ฉ) 2000X

ภาพที่ 4.26 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ของสูตร RL15F (ก, ค และ จ) และสูตร RL17F (ข, ง และ ฉ)



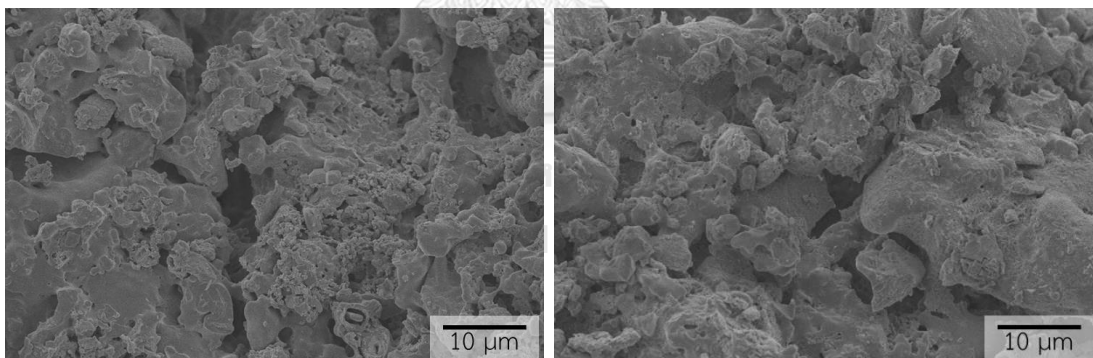
(ก) 200X

(ข) 200X



(ค) 500X

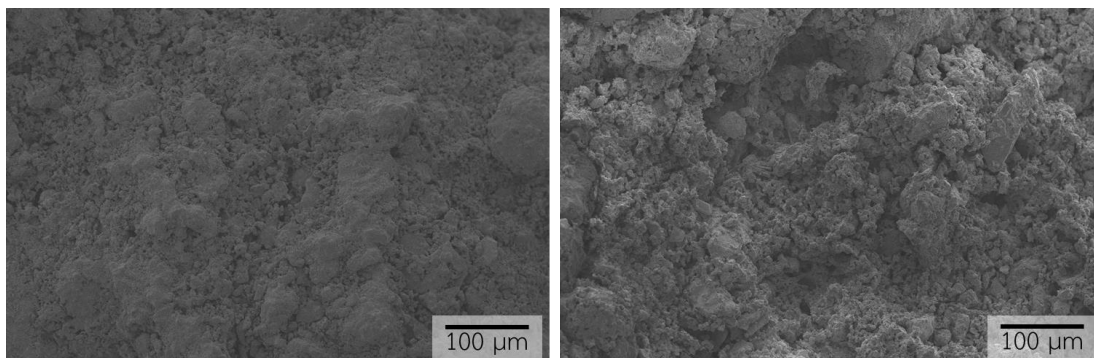
(ง) 500X



(จ) 2000X

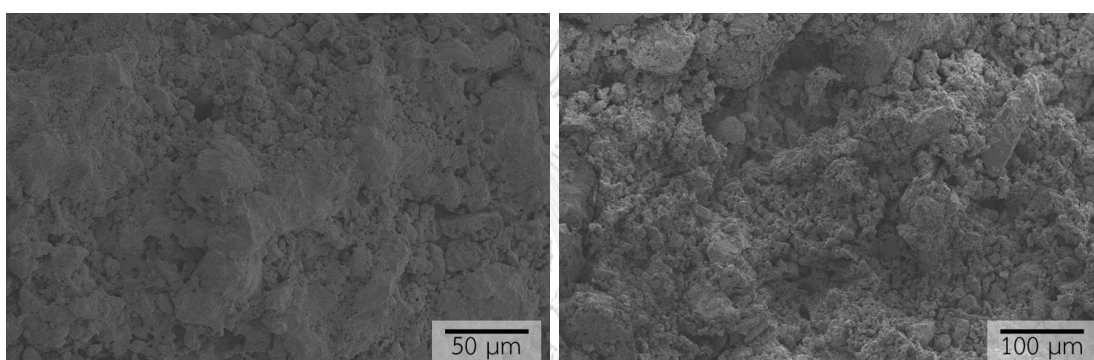
(ฉ) 2000X

ภาพที่ 4.27 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ของสูตร RL15F (ก, ค และ จ) และสูตร RL17F (ข, ง และ ฉ)



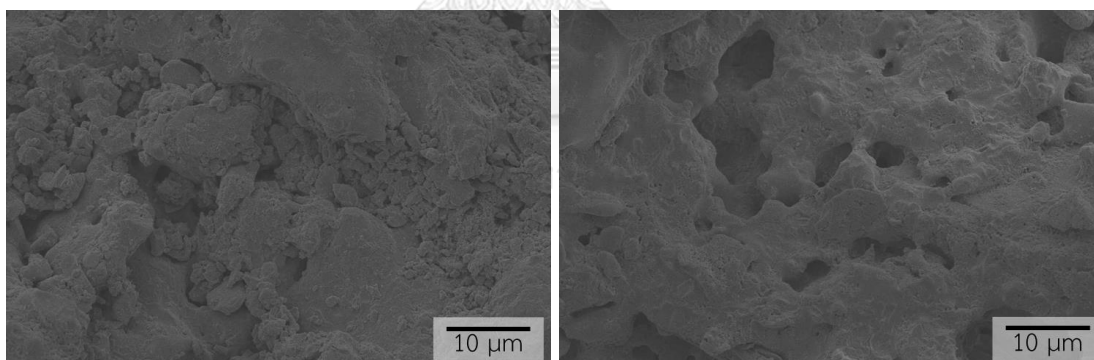
(ก) 200X

(ข) 200X



(ค) 500X

(ง) 500X



(จ) 2000X

(ฉ) 2000X

ภาพที่ 4.28 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส ของสูตร RL15F (ก, ค และ จ) และสูตร RL17F (ข, ง และ ฉ)

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการทดสอบสมบัติทางกายภาพและวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของชั้นงานอิฐมวลเบาเปรียบเทียบกับสมบัติของอิฐดินเผา สามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 ความเหนียวของเนื้อดิน ในการเตรียมเนื้อดินจะต้องเพิ่มหรือลดปริมาณน้ำให้เนื้อดินบ่มมีสัมประสิทธิ์ความเหนียวเท่ากับ 7.1 ซึ่งเป็นความเหนียวที่ใกล้เคียงกับเนื้อดินแบบโคลนอ่อน (Soft mud) ที่สามารถขึ้นรูปขึ้นงานด้วยมือได้

5.1.2 การหดตัวหลังอบแห้ง การเติมปูนปลาสเตอร์ในสัดส่วนร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ขึ้นไปสามารถช่วยลดการหดตัวหลังอบแห้งของชั้นงานลงได้เมื่อเทียบกับสูตรอิฐดินเผา แต่การเติมฟองโฟมควบคู่กับปูนปลาสเตอร์ ควรเติมปูนปลาสเตอร์ ร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก การหดตัวหลังอบแห้งจึงลดลง การเติมเส้นใยลิกไนต์ควบคู่กับปูนปลาสเตอร์ ประกอบกับการควบคุมความเหนียวของเนื้อดินด้วยการเติมน้ำเพิ่มยังคงมีการหดตัวที่ลดลงมากกว่าสูตรอิฐดินเผา แต่การเติมฟองโฟมสามารถช่วยลดการหดตัวหลังอบแห้งได้

5.1.3 การหดตัวหลังเผา ชั้นงานที่มีการหดตัวหลังอบแห้งที่สูงจะมีการหดตัวหลังเผาลดลงและในทางกลับกัน ชั้นงานที่มีการหดตัวหลังอบแห้งที่ต่ำจะมีการหดตัวหลังเผาที่สูง แต่เมื่อเผาชั้นงานในสูตรเดียวกันที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะปรากฏแนวโน้มการหดตัวหลังเผาเพิ่มขึ้น

5.1.4 ความหนาแน่น การเติมปูนปลาสเตอร์เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความหนาแน่นของชั้นงานมีค่าลดลง ประกอบกับการเติมเส้นใยลิกไนต์ในสูตรอิฐมวลเบาจะส่งเสริมความพรุนตัวที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความหนาแน่นลดต่ำกว่าสูตรอิฐดินเผา แต่ในอีกแง่หนึ่งของความหนาแน่นที่ลดต่ำลงมีผลมาจากฟองโฟมซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการเพิ่มรูพรุนภายในชั้นงาน ซึ่งสูตรที่มีการเติมฟองโฟมมีความหนาแน่นลดลงอย่างเห็นได้ชัด แต่ความหนาแน่นในสูตรเดียวกันจะมีแนวโน้มที่ความหนาแน่นเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิเผาสูงขึ้น

5.1.5 การดูดซึมน้ำ การดูดซึมน้ำของชั้นงานมีความสัมพันธ์แบบแปรผกผันตรงกับความพรุนตัวของชั้นงาน หรือแปรผกผันกับความหนาแน่นของชั้นงาน ดังนั้นชั้นงานที่มีความหนาแน่นต่ำ การดูดซึมน้ำจะสูง ซึ่งสูตรที่มีการเติมฟองโฟมจะมีความพรุนตัวมากทำให้มีการดูดซึมน้ำที่สูง ส่งผลให้

ชั้นงานที่มีการเติมทั้งเถ้าหนักลิกไนต์ ปูนปลาสเตอร์ และฟองโฟม มีการดูดซึมน้ำที่เพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม การดูดซึมน้ำจะลดลงเมื่ออุณหภูมิการเผาเพิ่มขึ้น

5.1.6 ความต้านทานแรงอัด ค่าความต้านทานแรงอัดแปรผันตรงกับความหนาแน่นของชั้นงาน เมื่อชั้นงานมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ความต้านทานแรงอัดจะเพิ่มขึ้นตาม ในทางกลับกันของความต้านทานแรงอัดที่มีค่าต่ำจะมาจากชั้นงานที่มีความหนาแน่นต่ำ และการเพิ่มอุณหภูมิจะส่งผลให้ความหนาแน่นของชั้นงานเพิ่มขึ้น ดังนั้นความต้านทานแรงอัดของชั้นงานจึงมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตาม

5.1.7 การนำความร้อน การนำความร้อนบ่งบอกถึงสมบัติความเป็นฉนวนกันความร้อนของชั้นงาน โดยชั้นงานที่มีการนำความร้อนสูงจะมีสมบัติการเป็นฉนวนที่ต่ำ หรือในทางกลับกันชั้นงานที่มีการนำความร้อนต่ำจะแสดงสมบัติความเป็นฉนวนกันความร้อนได้ดี ชั้นงานที่มีความพรุนตัวสูงจะมีการนำความร้อนได้ต่ำหรือมีความเป็นฉนวนกันความร้อนสูง ซึ่งสูตรที่มีการเติมฟองโฟมที่มีความพรุนตัวสูงจะมีความเป็นฉนวนที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับสูตรอิฐดินเผา รองลงมาเป็นสูตรที่มีความพรุนตัวจากการเติมเถ้าหนักลิกไนต์และปูนปลาสเตอร์ แต่การนำความร้อนจะเพิ่มขึ้นเมื่อเผาชั้นงานที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้น

5.1.8 สีของชั้นงาน อิฐดินเผาโดยปกติจะมีสีส้มถึงสีส้มเข้ม ในสูตรอิฐมวลเบาที่มีการเติมเถ้าหนักลิกไนต์ ชั้นงานมีสีน้ำตาลถึงน้ำตาลเข้ม โดยสีที่ปรากฏจะมีสีที่ชัดและเข้มขึ้นเมื่อเติมเถ้าหนักลิกไนต์ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น และการสุกตัวของเถ้าหนักลิกไนต์ที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้สีของชั้นงานมีความเข้มเพิ่มขึ้น แต่ในทางกลับกันในสูตรที่มีการเติมปูนปลาสเตอร์จะส่งผลให้ชั้นงานมีสีที่อ่อนลงหรือสว่างขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับสีของสูตรอิฐดินเผา

สรุปได้ว่า เถ้าหนักลิกไนต์มีความสามารถในการทดแทนดินราชบุรีบางส่วนได้และส่งผลให้ชั้นงานมีสมบัติตามต้องการ จากการเตรียมน้ำดินจากดินราชบุรีต่อน้ำ ร้อยละ 100:80 โดยน้ำหนัก ซึ่งมีการไหลตัวสูงเหมาะสมต่อการเติมฟองโฟม ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อความพรุนตัวของชั้นงานอิฐมวลเบา หลังจากการเติมฟองโฟมในระบบน้ำดิน น้ำดินสามารถเปลี่ยนเป็นเนื้อดินแบบโคลนอ่อนได้โดยอาศัยการทำปฏิกิริยาของปูนปลาสเตอร์กับโซเดียมซิลิเกตในอัตราส่วน 1:1 และเติมน้ำเพิ่มเติมเพื่อให้ความเหนียวของแต่สูตรมีค่าที่ใกล้เคียงกัน และเผาชั้นงานที่อุณหภูมิ 800 900 และ 1000 องศาเซลเซียส สูตรที่มีความเหมาะสมต่อการนำไปผลิตเป็นอิฐมวลเบาที่มีส่วนผสมของเถ้าหนักลิกไนต์และสารก่อโฟมขนาดเทียบเท่ากับขนาดของอิฐก่อสร้างสามัญ ได้แก่ สูตร RL14 ประกอบด้วย ดินราชบุรี ร้อยละ 40 เถ้าหนักลิกไนต์ ร้อยละ 60 ปูนปลาสเตอร์ ร้อยละ 20 และโซเดียมซิลิเกต ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก เผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส และสูตร RL17F ประกอบด้วย ดินราชบุรี ร้อยละ 40 เถ้าหนักลิกไนต์ ร้อยละ 60 ปูนปลาสเตอร์ ร้อยละ 20 โซเดียมซิลิเกต ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก และฟองโฟมปริมาตร 1 ลิตร เผาที่อุณหภูมิ 1000

องศาเซลเซียส ดังแสดงในภาพที่ 5.1 และเปรียบเทียบสมบัติกับอิฐดินเผามวลเบา และมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมอิฐบล็อกมวลเบา มอก.2601-2556 แสดงในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 สมบัติของอิฐมวลเบาสูตร RL14 และ RL17F เปรียบเทียบกับสมบัติของอิฐดินเผา มวลเบาและมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมอิฐบล็อกมวลเบา

สมบัติ	สูตรอิฐมวลเบา		อิฐดินเผา มวลเบา ^[15]	อิฐบล็อก มวลเบา มอก.2601-2556
	RL14	RL17F		
ความหนาแน่น (กรัมต่อ ลบ.ซม.)	1.16	1.12	1.20-1.50	≤1.20
ความต้านทานแรงอัด (เมกะพาสคัล)	2.54	1.00	2.0-12.0	2.0-5.0
การดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)	44.04	39.24	20.0-30.0	≤25.0
การนำความร้อน (วัตต์ต่อเมตรเคลวิน)	0.211	0.294	ปานกลาง	ต่ำ



(ก) (ข)

ภาพที่ 5.1 ชิ้นงานอิฐมวลเบาประกอบด้วย (ก) สูตร RL14 เเผที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส และ (ข) สูตร RL17F เเผที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) ศึกษาผลของอุณหภูมิการเผาและระยะเวลาเย็นไฟที่ส่งผลต่อสมบัติของชิ้นงาน
- 2) ศึกษาความสามารถของเนื้อดินในการขึ้นรูปชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่กว่าผลิตภัณฑ์อิฐก่อสร้างสามัญหรือเทียบเท่าขนาดของอิฐบล็อกมวลเบาในท้องตลาด

บรรณานุกรม

1. Sutas, J., Mana, A., and Pitak, L. 2012. **Effect of Rice Husk and Rice Husk Ash to Properties of Bricks.** *Procedia Engineering* 32: 1061-1067.
2. Wasanapiarnpong, T., Thueploy, A., Nilpairach, S., and Arayaphong, D. 2011. **Treatment of Scumming Effects of Pottery Clay by Sodium Carbonate Addition.** *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 18: 222018.
3. กระทรวงอุตสาหกรรม, มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม คอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ มอก.2601-2556.
4. Tounchuen, K., Buggakupta, W., and Panpa, W. 2014. **Characteristics of Automotive Glass Waste-Containing Gypsum Bodies Made from Used Plaster Mould.** *Key Engineering Materials* 608: 91-96.
5. Songchat, P. and Waroot, S. 2013. **Recycle of plaster mold waste via solution process.** Senior project. Chulalongkorn university.
6. ลดา พันธุ์สุขุมธนา. 2552. ปูนปลาสเตอร์กับการนำกลับมาใช้. *วารสารเซรามิกส์* 31: 34-36.
7. การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. 2562. **สัดส่วนการใช้เชื้อเพลิงผลิตพลังงานไฟฟ้าในระบบของ กฟผ. ปี 2561[ออนไลน์].** แหล่งที่มา: https://www.egat.co.th/index.php?option=com_content&view=article&id=2068&Itemid=24/10/2562
8. กระทรวงอุตสาหกรรม, มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม อิฐก่อสร้างสามัญ มอก.77-2545.
9. มานะ เอี่ยมบัว. 2554. การออกแบบและพัฒนาเพื่อเพิ่มมูลค่าผลิตภัณฑ์เครื่องปั้นดินเผาในเขตจังหวัดภาคตะวันออกเฉียงเหนือ. *วารสารวิจัยและพัฒนา วไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์* 11: 83-96.
10. สุทัศน์ จันทบัวลา. 2554. การออกแบบและพัฒนาเพื่อเพิ่มมูลค่าให้กับผลิตภัณฑ์อิฐมอญ ในเขตพื้นที่จังหวัดภาคตะวันออกเฉียงเหนือตอนกลาง. *วารสารวิจัยและพัฒนา วไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์* 11: 54-63.
11. Shimizu, T., Matsuura, K., Furue, H., and Matsuzak, K. 2013. **Thermal conductivity of high porosity alumina refractory bricks made by a slurry gelation and foaming method.** *Journal of the European Ceramic Society* 33: 3429-3435.

12. ทองอินทร์ ชมโท. 2555. อิฐมอญ อิฐมอญก้อนใหญ่ นวัตกรรมล่าสุดแห่งวงการอิฐมอญ [Online]. Available from: <https://www.xn--12cxbj1c5b5dkcc5ezjpci.com/30/10/2562>
13. อิฐแดง. 2552. อิฐประดับและอิฐแดง[Online]. Available from: <https://brickdd.com/25/10/2562>
14. 2556. อิฐทนไฟอะลูมินา[Online]. Available from: <http://spanish.kilnrefractorybricks.com/sale-9611742-low-bulk-density-insulating-high-alumina-brick-high-temperature-refractory-bricks.html> [12/09/2562]
15. Janbuala, S. 2015. **Effects of rice husk, rice husk ash, bagasse and bagasse ash on physical properties of lightweight clay brick**. Thesis. Materials science, Chulalongkorn university.
16. Thueploy, A. 2552. **Effects of Sodium Carbarnate on Scumming and Firing Properties of Ratchaburi Pottery Clay**. Thesis. Materials science, Chulalongkorn university.
17. ไพจิตร อิงศิริวัฒน์. เนื้อดินเซรามิก. (ed.), 1: 406. กรุงเทพฯ: โอเดียนสโตร์, 2541.
18. Ryan, W., Radford, C. 1987. **Whitewares production, testing, and quality control**. The institute of ceramics 23.
19. ปรีดา พิมพ์ขาวขำ. เซรามิกส์. (ed.), 2: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย: กรุงเทพฯ, 2539.
20. Ford, R.W. 1 - Introduction. In R.W. Ford (ed.), **Ceramics Drying**,1-2. Oxford: Pergamon, 1986.
21. Ryan, W. and Radford, C. 1987. **Whitewares production, testing, and quality control: including materials, body formulations, and manufacturing processes**. Published on behalf of the Institute of Ceramics by Pergamon Press.
22. Kingery, W.D. 1960. **Introduction to Ceramics**. Wiley.
23. Barsoum, M. and Barsoum, M.W. 2002. **Fundamentals of Ceramics**. Taylor & Francis.
24. Hennicke, H. 1977. **Structural Clay Products**. Texture of Crystalline Solids 2:
25. Auechalitanukul, C., McCuiston, R.C., Prasartseree, T., Pungpipat, P., and Olanaront, S. 2015. **Properties of Sintered Brick Containing Lignite Bottom Ash Substitutions**. Key Engineering Materials 659: 138-142.

26. ชัชวาลย์ เศรษฐบุต. คอนกรีตเทคโนโลยี Concrete Technology. (ed.), 1: 270. กรุงเทพฯ คอนกรีตผสมเสร็จซีแพค, 2539.
27. วินิต ช่อวิเชียร. คอนกรีตเทคโนโลยี Concrete technology. (ed.), 9: 232. กรุงเทพฯ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2527.
28. Bories, C., Borredon, M.-E., Vedrenne, E., and Vilarem, G. 2014. **Development of eco-friendly porous fired clay bricks using pore-forming agents: A review.** Journal of Environmental Management 143: 186-196.
29. ควอลิตี้คอนสตรัคชั่นโปรดักส์. คอนกรีตมวลเบา Q-CON ทางออกของทุกปัญหาในระบบงานก่อสร้างผนังและพื้น. (ed.), 5: 6. 2557.
30. สุทัศน์ จันบัวลา. 2558. อิฐดินเผามวลเบา ทางเลือกใหม่ของวัสดุก่อสร้าง. วารสารเซรามิกส์ 17-19.
31. Sutcu, M. and Akkurt, S. 2009. **The use of recycled paper processing residues in making porous brick with reduced thermal conductivity.** Ceramics international 35: 2625-2631.
32. Janbuala, S. and Wasanapiarnpong, T. 2016. **Lightweight Clay Brick Ceramic Prepared with Bagasse Addition.** ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences 11: 8380-8384
33. Demir, I., Baspinar, M.S., and Orhan, M. 2015. **Utilization of kraft pulp production residues in clay brick production.** Building and environment 40: 1533-1537.
34. Bilgin, N., et al. 2012. **Use of waste marble powder in brick industry.** Construction and Building Materials 29: 449-457.
35. การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. ถ้าวอลเลย์บอลในงานคอนกรีตกับการอนุรักษ์พลังงานและสิ่งแวดล้อม. สถาบันบัณฑิตวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีไทย (ed.), 3: กรมทรัพยากรธรณี, 2544.
36. กรมทรัพยากรธรณี. 2546. การพัฒนาการใช้ประโยชน์ถ้าวอลเลย์บอลในงานในประเทศไทย. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย 3.
37. บุญญวัฒน์ ขุนอินทร์. สถานการณ์อุตสาหกรรมเหมืองแร่ของไทยปี 2555 และแนวโน้มปี 2556. (ed.), 3: สำนักบริหารยุทธศาสตร์., 2555.
38. ลดา พันธุ์สุขุมนา. 2551. ปูนปลาสเตอร์กับการนำกลับมาใช้. วารสารเซรามิกส์ 30.

39. Tounchuen, K., Buggakupta, W., and Panpa, W. 2014. **Preparation and characterization of gypsum-based materials from industrial wastes.** Key Engineering Materials 608: 91-96.
40. สุธรรม ศรีหล่มสัก. 2552. การเลือก deflocculants และ flocculants ในน้ำสลิป. วารสารเซรามิกส์ 1-3.
41. Leiva, C., et al. 2016. **Characteristics of fired bricks with co-combustion fly ashes.** Journal of Building Engineering 5: 114-118.
42. Tayler, G.V. and Daidone, W. 2011. **The use of bottom ash in the manufacture of clay face brick.** World of Coal Ash (WOCA).
43. สุทัศน์ จันบัวลา. 2552. การพัฒนาผลิตภัณฑ์อิฐดินเผาจังหวัดสิงห์บุรี. Journal of Food Health and Bioenvironmental Science 2: 15-24.
44. Ibrahim, N.M., Salehuddin, S., Amat, R.C., Rahim, N.L., and Izhar, T.N.T. 2013. **Performance of lightweight foamed concrete with waste clay brick as coarse aggregate.** Apccbee Procedia 5: 497-501.
45. Pimraksa, K. and Chindaprasirt, P. 2009. **Lightweight bricks made of diatomaceous earth, lime and gypsum.** Ceramics International 35: 471-478.
46. Tounchuen, K., Buggakupta, W., and Panpa, W. 2014. **Characteristics of Automotive Glass Waste-Containing Gypsum Bodies Made from Used Plaster Mould.** Thesis. Materials Science, Chulalongkorn university,.
47. อนุชา วาศัยกุล และคณะ. 2559. **Preparation of Lightweight Clay Brick by Foaming Agent.** Senior project. Materials science, Chulalongkorn university,.
48. Prasartseree, T., Wasanapiarnpong, T., Mongkolkachit, C., and Jiraborvornpongsa, N. 2018. **Influence of Lignite Bottom Ash on Pyroplastic Deformation of Stoneware Ceramic Tiles.** Key Engineering Materials 766: 264-269.
49. Andrade, F.A., Al-Qureshi, H.A., and Hotza, D. 2011. **Measuring the plasticity of clays: A review.** Applied Clay Science 51: 1-7.
50. Nawaukkaratharnant, N., Wiratphinthu, B., Nilpairach, S., Mongkolkachit, C., and Wasanapiarnpong, T. 2014. **Effect of Alumina Source and Soaking Time on Properties of Refractory Mortar Using as Slumping Mold.** Key Engineering Materials 608: 301-306.



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	วิษณุ มะลิแย้ม
วัน เดือน ปี เกิด	01 ธันวาคม 2535
สถานที่เกิด	
วุฒิการศึกษา	1) วิทยาศาสตรบัณฑิต จากภาควิชาวัสดุศาสตร์ สาขาเซรามิก คณะ วิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2559 2) วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต จากภาควิชาวัสดุศาสตร์ สาขาเทคโนโลยีเซรามิก คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2562
ที่อยู่ปัจจุบัน	บ้านเลขที่ 19 หมู่ที่ 8 ถนนประสิทธิ์พร ตำบลแขงบาดาล อำเภอสมเด็จ จังหวัดกาฬสินธุ์ 46150
ผลงานตีพิมพ์	1) การนำเสนอผลงานทางวิชาการระดับนานาชาติแบบโปสเตอร์ ในหัวข้อ “Preparation of Lightweight Clay Brick with Lignite Bottom Ash Addition” ในการประชุมทางวิชาการ the Pure and Applied Chemistry International Conference 2019 (PACCON 2019) ระหว่าง วันที่ 7-8 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2562 ณ ศูนย์นิทรรศการและการประชุม ไบเทค (BITEC) และได้รับการตีพิมพ์ผลงานแบบ Proceeding 2) การนำเสนอผลงานทางวิชาการระดับนานาชาติแบบโปสเตอร์ เรื่อง “Preparation of Lightweight Clay Brick with Adding Lignite Bottom Ash and Foaming Agent” ในการประชุมทางวิชาการ International Conference on Traditional and Advanced Ceramics (ICTA 2019) ระหว่างวันที่ 28-29 สิงหาคม พ.ศ. 2562 ณ ศูนย์แสดงสินค้า และการประชุม อิมแพค เมืองทองธานี (IMPACT)