

ผลของเก้าถ่านหินบิทูมินัสต่อสมบัติของเนื้อเซรามิกดินเผา



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีเซรามิก ภาควิชาวัสดุศาสตร์
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2561
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Effects of Bituminous Coal Ash on Properties in Ceramic Pottery Products



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

Department of Materials Science

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2018

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของเถ้าถ่านหินบิทูมินัสต่อสมบัติของเนื้อเซรามิกดินเผา
โดย	นายญาณวุฒิ วงศ์หอม
สาขาวิชา	เทคโนโลยีเซรามิก
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนากร วาสนาเพียรพงศ์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิริพรรณ นิลไพรัช

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของ
การศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

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

ญานวุฒิ วงศ์หอม : ผลของเถ้าถ่านหินบิทูมินัสต่อสมบัติของเนื้อเซรามิกดินเผา. (Effects of Bituminous Coal Ash on Properties in Ceramic Pottery Products)
 อ.ที่ปรึกษาหลัก : ผศ. ดร.ธนากร วาสนาเพียรพงศ์, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ผศ. ดร.สิริพรรณ
 นิลไพรัช

เถ้าหนักและเถ้าลอยจากถ่านหินบิทูมินัสเป็นของเสียซึ่งเกิดจากกระบวนการเผาถ่านหินในโรงไฟฟ้าถ่านหินเพื่อใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า เถ้าทั้งสองชนิดมีความเป็นไปได้ที่จะถูกนำมาใช้งานใหม่ในโรงงานเซรามิกเครื่องปั้นดินเผาเพื่อแทนที่ทรายและหินผุซึ่งใช้ในอุตสาหกรรมทางด้านนี้ เนื่องจากมีองค์ประกอบทางเคมีหลัก คือ ซิลิกา อะลูมินา เหมือนกัน งานวิจัยนี้ได้ทดลองใช้เถ้าถ่านหินทั้ง 2 ชนิดแทนที่วัสดุผสมดั้งเดิมในกลุ่มผลิตภัณฑ์เซรามิกทั้ง 5 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มอุตสาหกรรมเครื่องปั้นดินเผาโอ่งมังกรจังหวัดราชบุรี กลุ่มเครื่องปั้นดินเผาจังหวัดจันทบุรี กลุ่มอิฐดินเผาก่อสร้างจังหวัดอ่างทอง กลุ่มอิฐดินเผาก่อสร้างจังหวัดชลบุรีและกลุ่มกระเบื้องเซรามิกจังหวัดสระบุรี สัดส่วนของเถ้าหนักและเถ้าลอยจะอยู่ระหว่าง 10-40 wt% ผสมรวมกันดินแต่ละท้องถิ่นของแต่ละอุตสาหกรรม ยกเว้นกระเบื้องสระบุรีที่จะใช้ดินจากจังหวัดปราจีนบุรีแทนกับเถ้าเข้าด้วยกัน จากนั้นขึ้นรูปเป็นเม็ดกลม แท่งกลม และกระเบื้อง เผาที่อุณหภูมิ 800-1200 °C ขึ้นกับสูตรของแต่ละอุตสาหกรรม ชิ้นงานจะถูกนำมาเทียบสมบัติกับชิ้นงานสูตรอ้างอิงที่ใช้สูตรเดียวกับกลุ่มอุตสาหกรรม ผลการทดลองพบว่า ชิ้นงานที่มีการผสมเถ้าหนักและเถ้าลอยจะมีสมบัติหลายอย่าง อาทิ ค่าการดูดซึมน้ำ ความแข็งแรง และสีใกล้เคียงกับชิ้นงานอ้างอิง อย่างไรก็ตามสัดส่วนของเถ้าไม่ควรสูงกว่า 20 wt% เนื่องจากความเหนียวของเนื้อดินปั้นจะลดลงจนไม่สามารถขึ้นรูปด้วยการอัดรีดได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
 CHULALONGKORN UNIVERSITY

สาขาวิชา เทคโนโลยีเซรามิก
 ปีการศึกษา 2561

ลายมือชื่อนิสิต
 ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก
 ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

5972164323 : MAJOR CERAMIC TECHNOLOGY

KEYWORD: Bituminous coal ash, Fly ash, Bottom ash, Ceramic pottery

Yannawut Wonghom : Effects of Bituminous Coal Ash on Properties in Ceramic Pottery Products. Advisor: Asst. Prof. Thanakorn Wasanapiampong, Ph.D. Co-advisor: Asst. Prof. Siripan Nilpairach, Ph.D.

Bituminous bottom ash and fly ash are the solid wastes which are generated from the coal power plant. The coal ashes have been interested to utilize as a replacement for river sand and pottery stone in ceramic industries because the main compositions in the coal ashes include silica and alumina as obtained in river sand and pottery stone. To investigate the possibility, this study has tried to use bottom ash and fly ash in five ceramic pottery industry groups including: Ratchaburi dragon jar group, Chantaburi pottery group, Angthong construction brick group, Chonburi construction brick group and Saraburi tile group. Bottom ash and fly ash were varied in range for 10-40 wt% and mixed with the industry local clays except for Saraburi tile which used Prachinburi clay instead. Then formed to pellet shape, cylinder and tile. After that, the clay samples were fired 800-1200 °C according to the recipe of each industry. The results were compared with the reference sample of each industry. The results indicated that the sample which addition bottom ash and fly ash had many properties such as water absorption, modulus of rupture and color similar to the reference samples. However, the limitation of ashes should not exceed 20 wt% because the plasticity of the clay body would be decreased until it could not form by an extrusion process.

Field of Study: Ceramic Technology

Student's Signature

Academic Year: 2018

Advisor's Signature

Co-advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จเสร็จสิ้นได้ด้วยดีด้วยการสนับสนุนที่ดีจากทั้งทางบริษัทและบุคคลผู้คอยยินดีให้ความช่วยเหลือในหลายด้าน ข้าพเจ้า นายญาณวุฒิ วงศ์หอม ผู้จัดทำวิทยานิพนธ์ต้องขอขอบพระคุณ

กลุ่มบริษัท โกลว์ กรุ๊ป จำกัด มหาชน ที่เอื้อเฟื้อเถ่าถ่านหินบิทูมินัส ทั้งเถ่าหนักและเถ่าลอยที่ใช้ตลอดการทำวิทยานิพนธ์ วิทยานิพนธ์สมบูรณ์ไม่ได้เลยหากไม่มีผู้ให้การสนับสนุนด้านวัตถุดิบที่ดีเช่นกลุ่มบริษัทนี้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนากร วาสนาเพียรพงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิริพรรณ นิลไพรัช อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ผู้คอยให้คำแนะนำ ปรึกษา อบรม สั่งสอน ช่วยเหลือแก้ไขปัญหาค่างๆ อาจารย์ทั้งสองท่านเป็นอาจารย์ที่มอบความรัก ความเอาใจใส่ให้แก่ลูกศิษย์อย่างแท้จริง

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่าน ผู้สั่งสอน อบรมและให้ความรู้แก่ข้าพเจ้า จนสามารถเข้าใจและอธิบายหลักการรวมไปถึงผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นในวิทยานิพนธ์เล่มนี้

ขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ สาขาเทคโนโลยีเซรามิก ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ผู้ที่คอยรับฟังปัญหา ให้คำปรึกษา และช่วยเหลือตามกำลังที่ตัวเองสามารถช่วยได้ การได้เข้ามาเรียนในสาขาวิชานี้ทำให้ข้าพเจ้ารู้สึกอบอุ่นและมีความสุขตลอดการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณครอบครัวของข้าพเจ้า ที่คอยเป็นกำลังใจ ร่วมทุกข์ ร่วมสุขและให้การสนับสนุนที่ดีตลอดมา ขอบคุณที่เข้าใจและให้กำลังใจจนผ่านวันที่ชีวิตไม่เป็นดังหวังมาได้

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าสัญญาว่า จะนำความรู้ ความเข้าใจและทักษะที่ได้จากการทำงานวิจัยเล่มนี้ไปประยุกต์และปรับใช้ในอนาคต จะช่วยเหลือ แนะนำผู้อื่น และทำหน้าที่ของตัวเองให้ดีที่สุดต่อไป

ญาณวุฒิ วงศ์หอม

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 ถ่านหิน.....	3
2.1.1 พีต (Peat).....	3
2.1.2 ลิกไนต์ (Lignite).....	4
2.1.3 ซับบิทูมินัส (Subbituminous).....	4
2.1.4 บิทูมินัส (Bituminous).....	4
2.1.5 แอนทราไซต์ (Anthracite).....	4
2.2 ถ่านหิน.....	5
2.2.1 ถ่านลอย.....	6
2.2.2 ถ่านหนัก.....	7
2.2.3 การนำถ่านไปใช้ประโยชน์.....	7
2.3 ที่มา ประวัติพอสังเขป และแนวทางการนำไปประยุกต์ใช้.....	8

2.3.1	กลุ่มอุตสาหกรรมเครื่องปั้นดินเผาโอ่งมังกรจังหวัดราชบุรี	8
2.3.2	กลุ่มเครื่องปั้นดินเผาจังหวัดจันทบุรี	10
2.3.3	กลุ่มอิฐดินเผาก่อสร้างจังหวัดอ่างทอง	12
2.3.4	กลุ่มอิฐดินเผาก่อสร้างจังหวัดชลบุรี	13
2.3.5	กลุ่มกระเบื้องเซรามิกจังหวัดสระบุรี	15
2.4	ผลงานวิจัยอื่นที่เกี่ยวข้อง	16
บทที่ 3	วิธีการดำเนินงานวิจัย	22
3.1	สารเคมีและวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย	22
3.2	อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย	22
3.3	ขั้นตอนการเตรียมวัสดุดิบและก้อนดินผสม	24
3.3.1	การเตรียมวัสดุดิบ	24
3.3.2	การเตรียมก้อนดินผสม	24
3.4	ขั้นตอนการขึ้นรูปชิ้นงาน และการเผาชิ้นงาน	26
3.4.1	ขึ้นรูปเม็ดกลม (Pellet)	26
3.4.2	ขึ้นรูปชิ้นงานแท่งกลม (Cylinder)	27
3.4.3	ขึ้นรูปชิ้นงานกระเบื้อง (Tile)	27
3.4.4	การเผาชิ้นงาน	28
3.5	แผนผังการทดลอง	29
3.6	การวิเคราะห์สมบัติและลักษณะของวัสดุดิบและชิ้นงาน	31
3.6.1	การวิเคราะห์ขนาดอนุภาคด้วยเทคนิคการวัดการกระจายอนุภาค (Particle Size Analyzer)	31
3.6.2	การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer : XRD)	32
3.6.3	การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่องวิเคราะห์การเรืองแสงด้วยรังสีเอกซ์ (X-ray fluorescence : XRF)	32

3.6.4 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM)	33
3.6.5 การหดตัวของชิ้นงานเมื่อแห้ง (Drying Shrinkage).....	34
3.6.6 การหดตัวของชิ้นงานหลังเผา (Firing Shrinkage).....	34
3.6.7 ค่าการดูดซึมน้ำ (Water Absorption).....	34
3.6.8 การวัดค่าสีด้วยเทคนิค CIELab.....	36
3.6.9 การทดสอบโมดูลัสแตกร้าวด้วยเทคนิควิเคราะห์ความแข็งแรงแบบ 3 จุด (3-point bending strength)	36
บทที่ 4 ผลการดำเนินงานวิจัย	38
4.1 ลักษณะเฉพาะของวัสดุดิบ.....	38
4.1.1 การกระจายอนุภาค.....	38
4.1.2 องค์ประกอบเฟสโครงสร้างผลึก.....	40
4.1.3 องค์ประกอบทางเคมี	45
4.1.4 โครงสร้างจุลภาค.....	47
4.2 ผลของเก้าถ่านหินบิทูมินัสต่อสมบัติของชิ้นงานตัวอย่างผลิตภัณฑ์เซรามิก	51
4.2.1 การหดตัวของชิ้นงานเมื่อแห้ง (Drying Shrinkage).....	51
4.2.2 การหดตัวหลังเผา (Firing Shrinkage).....	56
4.2.3 ค่าการดูดซึมน้ำ (Water Absorption).....	59
4.2.4 ค่าโมดูลัสแตกร้าว (Modulus of Rupture).....	64
4.3 ผลของเก้าถ่านหินบิทูมินัสต่อลักษณะเฉพาะของเนื้อผลิตภัณฑ์เซรามิกหลังเผา	67
4.3.1 สีและรูปร่างภายนอกของชิ้นงาน	67
4.3.2 องค์ประกอบเฟสโครงสร้างผลึก	73
4.3.3 โครงสร้างจุลภาค.....	78
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ	83

5.1 สรุปผลการวิจัย.....	83
5.2 ข้อเสนอแนะ	84
บรรณานุกรม.....	86
ประวัติผู้เขียน.....	92



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 สมบัติของถ่านหินชนิดต่างๆ.....	4
ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบทางเคมีของถ่านลอกจากถ่านหินในสหรัฐอเมริกา.....	6
ตารางที่ 3.1 สูตรส่วนผสมสำหรับดินเหนียวราชบุรี (R) และดินเหนียวจันทบุรี (J) น้ำหนักรวม 2,000 กรัม ผสมน้ำ 22 wt% (สูตรอ้างอิงคือ R3 และ J3).....	25
ตารางที่ 3.2 สูตรส่วนผสมสำหรับดินเหนียวชลบุรี (C) และดินเหนียวอ่างทอง (A) น้ำหนักรวม 2,000 กรัม ผสมน้ำ 22 wt% (สูตรอ้างอิงคือ C2 และ A2).....	26
ตารางที่ 3.3 ส่วนผสมสำหรับดินดำปราจีนบุรี (P) น้ำหนักรวม 2,000 กรัม ผสมน้ำ 7 wt% (สูตรอ้างอิงคือ P1).....	26
ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ.....	46

สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1	ประเภทของถ่านหิน [7]	3
รูปที่ 2.2	โรงไฟฟ้าพลังงานถ่านหิน [13]	5
รูปที่ 2.3	ถ้ำลอยบิทุมินัส	7
รูปที่ 2.4	ถ้ำหนกบิทุมินัส	7
รูปที่ 2.5	ก) การเตรียมดิน ข) การขึ้นรูปโอง ค) การเผาโองในเตา และ ง) โองสำเร็จรูปพร้อมใช้งาน [19-22].....	9
รูปที่ 2.6	ตำแหน่งของบ้านเตาหม้อตัวเมืองจันทบุรี [23]	10
รูปที่ 2.7	เครื่องปั้นดินเผาจังหวัดจันทบุรี [23, 24]	11
รูปที่ 2.8	วัดพระศรีสรรเพชญ์จังหวัดพระนครศรีอยุธยา สร้างด้วยอิฐมอญ [25]	12
รูปที่ 2.9	ขั้นตอนการผลิตอิฐมอญ ก) การเผาอิฐมอญด้วยแกลบ และ ข) การตากอิฐ [28].....	13
รูปที่ 2.10	อิฐดินเผาก่อสร้างจังหวัดอ่างทองและภาพเตาเผาทรงโดม	13
รูปที่ 2.11	แผนที่อำเภอพานทอง จังหวัดชลบุรี [30]	14
รูปที่ 2.12	ก) อิฐมอญเคเค ข) อิฐมอญใหญ่ 4 รู ค) อิฐมอญใหญ่ 2 รู และ ง) อิฐมอญตันก่อเล็ก [31]	15
รูปที่ 2.13	ภาพเตาเผารูปทรงโดมสำหรับการเผาอิฐดินเผาก่อสร้างจังหวัดชลบุรี [30]	15
รูปที่ 2.14	กระเบื้องดินเผาจังหวัดสระบุรี	16
รูปที่ 2.15	ก) ค่าการดูดซึมน้ำ และ ข) ความแข็งแรงต่อการกดของชิ้นงานเมื่อผสมถ้ำลอยอัตราส่วน 0-100% เผาที่อุณหภูมิ 800 900 และ 1000 °C [33]	17
รูปที่ 2.16	โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานจากการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ก) ดิน100% และ ข) ดิน50% ผสมถ้ำลอย 50% [34]	18
รูปที่ 2.17	ผลการวิเคราะห์สมบัติของชิ้นงานที่ผสมถ้ำลอยอัตราส่วนต่างๆ ก) การดูดซึมน้ำ และ ข) ความแข็งแรงต่อการกด [34].....	18

รูปที่ 2.18 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานจากการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ก) แบบไม่เติมเถ้าหนัก และ ข) แบบเติมเถ้าหนัก [35].....	19
รูปที่ 2.19 ผลวิเคราะห์การหดตัวและความแข็งแรงต่อการโค้งงอของชิ้นงานของ ดินปกติ(ซ้าย) ดินผสมทราย(กลาง) และดินผสมทรายและเถ้าหนัก (ขวา) [35].....	19
รูปที่ 2.20 ผลการทดสอบสมบัติต่างๆของชิ้นงานที่ผสมเถ้าหนักอัตราส่วนต่างกัน ก) การดูดซึมน้ำ และ ข) การมีรูพรุน [36].....	20
รูปที่ 3.1 ลักษณะภายนอกของเถ้าถ่านหินบิทูมินัส ก) เถ้าหนัก และ ข) เถ้าลอย	22
รูปที่ 3.2 ลักษณะภายนอกของดิน 5 ชนิด ก) ดินเหนียวราบบุรี ข) ดินเหนียวจันทบุรี ค) ดินเหนียวอ่างทอง ง) ดินเหนียวชลบุรี และ จ) ดินดำปราจีนบุรี.....	23
รูปที่ 3.3 ลักษณะภายนอกของวัตถุดิบตัวเติม ก) ทรายแม่น้ำ และ ข) หินผุ.....	23
รูปที่ 3.4 เครื่องบด Rotary mill รุ่น RC-30.....	24
รูปที่ 3.5 การเตรียมก้อนดินผสม.....	24
รูปที่ 3.6 การอัดขึ้นรูปชิ้นงานเม็ดกลม.....	27
รูปที่ 3.7 การขึ้นรูปชิ้นงานด้วยวิธีการอัดรีด.....	27
รูปที่ 3.8 การขึ้นรูปชิ้นงานกระเบื้อง.....	27
รูปที่ 3.9 เตาเผาที่ใช้ในงานวิจัย ก) เตาเผา Gradient ข) เตาเผา Inter kilns และ ค) ตัวอย่างชิ้นงานหลังเผา.....	28
รูปที่ 3.10 แผนผังการทำงานวิจัย.....	31
รูปที่ 3.11 เครื่อง Particle Size Analyzer ยี่ห้อ Malvern รุ่น Mastersizer 2000.....	31
รูปที่ 3.12 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advance [37].....	32
รูปที่ 3.13 เครื่องวิเคราะห์การเรืองแสงด้วยรังสีเอกซ์ [38].....	33
รูปที่ 3.14 เครื่อง SEM ยี่ห้อ Jeol รุ่น JSM-6480LV.....	33
รูปที่ 3.15 การแช่ชิ้นงานเพื่อวัดการดูดซึมน้ำ.....	35
รูปที่ 3.16 เครื่อง Chroma meter ยี่ห้อ Konica Minolta รุ่น CR-400	36
รูปที่ 3.17 เครื่อง Tensile / Compression Strength Tester ยี่ห้อ Hung Ta รุ่น HT-8116.....	37

รูปที่ 4.1 การกระจายขนาดอนุภาคของเถ้าลอยและเถ้าหนัก.....	38
รูปที่ 4.2 การกระจายขนาดอนุภาคของดิน 5 ชนิด ได้แก่ ดินราชบุรี ดินจันทบุรี ดินอ่างทอง ดิน ชลบุรี และดินปราจีนบุรี.....	39
รูปที่ 4.3 การกระจายขนาดอนุภาคของหินผุและทรายแม่น้ำ	39
รูปที่ 4.4 โครงผลึกของวัตถุดิบก่อนผสมและเผา ก) เถ้าหนัก และ ข) เถ้าลอย	40
รูปที่ 4.5 โครงผลึกของดินที่ใช้ในงานวิจัย ก) ดินเหนียวราชบุรี ข) ดินเหนียวจันทบุรี ค) ดินเหนียว อ่างทอง ง) ดินเหนียวชลบุรี และ จ) ดินดำปราจีนบุรี.....	41
รูปที่ 4.6 โครงผลึกของวัตถุดิบตัวเต็ม ก) ทรายแม่น้ำ และ ข) หินผุ	44
รูปที่ 4.7 โครงสร้างจุลภาคของเถ้าถ่านหินบิทูมินัส ก) เถ้าหนัก และ ข) เถ้าลอย	47
รูปที่ 4.8 โครงสร้างจุลภาคของดินทั้ง 5 ชนิด ก) ดินเหนียวราชบุรี ข) ดินเหนียวจันทบุรี ค) ดิน เหนียวอ่างทอง ง) ดินเหนียวชลบุรี และ จ) ดินดำปราจีนบุรี.....	48
รูปที่ 4.9 โครงสร้างจุลภาคของวัตถุดิบตัวเต็ม ก) ทรายแม่น้ำ และ ข) หินผุ.....	50
รูปที่ 4.10 ค่าการหดตัวของชิ้นงานเมื่อแห้งของชิ้นงานดินเหนียวราชบุรี.....	52
รูปที่ 4.11 ค่าการหดตัวของชิ้นงานเมื่อแห้งของชิ้นงานดินเหนียวจันทบุรี	52
รูปที่ 4.12 ค่าการหดตัวของชิ้นงานเมื่อแห้งของชิ้นงานดินเหนียวอ่างทอง	53
รูปที่ 4.13 ค่าการหดตัวของชิ้นงานเมื่อแห้งของชิ้นงานดินเหนียวชลบุรี	54
รูปที่ 4.14 ค่าการหดตัวของชิ้นงานเมื่อแห้งของชิ้นงานดินดำปราจีนบุรี.....	55
รูปที่ 4.15 ค่าการหดตัวหลังเผาของชิ้นงานดินเหนียวราชบุรี.....	56
รูปที่ 4.16 ค่าการหดตัวหลังเผาของชิ้นงานดินเหนียวจันทบุรี.....	57
รูปที่ 4.17 ค่าการหดตัวหลังเผาของชิ้นงานดินเหนียวอ่างทอง.....	57
รูปที่ 4.18 ค่าการหดตัวหลังเผาของชิ้นงานดินเหนียวชลบุรี	58
รูปที่ 4.19 ค่าการหดตัวหลังเผาของชิ้นงานดินดำปราจีนบุรี	59
รูปที่ 4.20 ค่าการดูดซึมน้ำของชิ้นงานดินเหนียวราชบุรี	60
รูปที่ 4.21 ลักษณะชิ้นงานที่มีการพองตัวที่ผิว.....	60
รูปที่ 4.22 ชิ้นงานดินเหนียวราชบุรีผสมเถ้าลอย 20 wt% เผาที่อุณหภูมิ 1200 °C เกิดแกนสีดำ... 60	

รูปที่ 4.23 ค่าการดูดซึมน้ำของชิ้นงานดินเหนียวจันทบุรี	61
รูปที่ 4.24 ค่าการดูดซึมน้ำของชิ้นงานดินเหนียวอ่างทอง	61
รูปที่ 4.25 ค่าการดูดซึมน้ำของชิ้นงานดินเหนียวชลบุรี	62
รูปที่ 4.26 ค่าการดูดซึมน้ำของชิ้นงานดินดำปราจีนบุรี	63
รูปที่ 4.27 ค่าโมดูลัสแตกร้าวของชิ้นงานดินเหนียวราชบุรี	64
รูปที่ 4.28 ค่าโมดูลัสแตกร้าวของชิ้นงานดินเหนียวจันทบุรี	65
รูปที่ 4.29 ค่าโมดูลัสแตกร้าวของชิ้นงานดินเหนียวอ่างทอง	65
รูปที่ 4.30 ค่าโมดูลัสแตกร้าวของชิ้นงานดินเหนียวชลบุรี	66
รูปที่ 4.31 ค่าโมดูลัสแตกร้าวของชิ้นงานดินดำปราจีนบุรี	67
รูปที่ 4.32 ชิ้นงานดินเหนียวราชบุรีหลังผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1100, 1150, 1175 และ 1200 °C	68
รูปที่ 4.33 ผลการวิเคราะห์ค่าสีในระบบ CIELab ของชิ้นงานดินเหนียวราชบุรี	68
รูปที่ 4.34 ชิ้นงานดินเหนียวจันทบุรีหลังผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1100, 1150, 1175 และ 1200 °C	69
รูปที่ 4.35 ผลการวิเคราะห์ค่าสีในระบบ CIELab ของชิ้นงานดินเหนียวจันทบุรี	69
รูปที่ 4.36 ชิ้นงานดินเหนียวอ่างทองหลังผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 800, 900 และ 1000 °C	70
รูปที่ 4.37 ผลการวิเคราะห์ค่าสีในระบบ CIELab ของชิ้นงานดินเหนียวอ่างทอง	70
รูปที่ 4.38 ชิ้นงานดินเหนียวชลบุรีหลังผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 800, 900 และ 1000 °C	71
รูปที่ 4.39 ผลการวิเคราะห์ค่าสีในระบบ CIELab ของชิ้นงานดินเหนียวชลบุรี	71
รูปที่ 4.40 ชิ้นงานดินดำปราจีนบุรีหลังผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1100, 1150, 1175 และ 1200 °C	72
รูปที่ 4.41 ผลการวิเคราะห์ค่าสีในระบบ CIELab ของชิ้นงานดินดำปราจีนบุรี	72
รูปที่ 4.42 โครงผลึกของชิ้นงานดินเหนียวราชบุรีผสมเถ้าหนัก 20 wt% เผาที่อุณหภูมิ 1200 °C ..	73
รูปที่ 4.43 โครงผลึกของชิ้นงานดินเหนียวจันทบุรีเผาที่อุณหภูมิ 1200 °C ก) ผสมเถ้าหนัก 20 wt% ข) ผสมเถ้าลอย 20 wt%	74
รูปที่ 4.44 โครงผลึกของชิ้นงานดินเหนียวอ่างทองเผาที่อุณหภูมิ 1200 °C ก) ผสมเถ้าหนัก 20 wt% และ ข) ผสมเถ้าลอย 20 wt%	75

รูปที่ 4.45 โครงผลึกของชิ้นงานดินเหนียวชลบุรีเผาที่อุณหภูมิ 1200 °C ก) ผสมเถ้าหนัก 20 wt% และ ข) ผสมเถ้าลอย 20 wt% 76

รูปที่ 4.46 โครงผลึกที่อยู่ในชิ้นงานผลิตภัณฑ์กระเบื้อง ก) ดินปราจีนบุรีผสมเถ้าหนัก 50 wt% และ ข) ดินปราจีนบุรีผสมเถ้าลอย 50 wt% 77

รูปที่ 4.47 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานดินเหนียวราชบุรีผสมเถ้าหนัก 20 wt% เผาที่อุณหภูมิ 1200 °C..... 78

รูปที่ 4.48 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานดินเหนียวจันทบุรี เผาที่อุณหภูมิ 1200 °C ก) ผสมเถ้าหนัก 20 wt% และ ข) ผสมเถ้าลอย 20 wt%..... 79

รูปที่ 4.49 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานดินเหนียวอ่างทอง เผาที่อุณหภูมิ 900 °C ก) ผสมเถ้าหนัก 20 wt% และ ข) ผสมเถ้าลอย 20 wt%..... 80

รูปที่ 4.50 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานดินเหนียวชลบุรี เผาที่อุณหภูมิ 900 °C ก) ผสมเถ้าหนัก 20 wt% และ ข) ผสมเถ้าลอย 20 wt%..... 81

รูปที่ 4.51 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานดินดำปราจีนบุรี เผาที่อุณหภูมิ 1150 °C ก) ผสมเถ้าหนัก 50 wt% และ ข) ผสมเถ้าลอย 50 wt%..... 82

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ถ่านหิน เป็นวัสดุที่เกิดจากการสะสมตัวของซากพืชซากสัตว์ ผ่านการทับถมเป็นเวลานาน จนแปรสภาพเป็นถ่านหิน สามารถใช้งานได้หลากหลายด้าน เช่น ใช้เป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อน ใช้ในการถลุงเหล็ก การผลิตกระแสไฟฟ้า ในการผลิตกระแสไฟฟ้า ถ่านหินนิยมใช้เป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้เพื่อให้เกิดเป็นไอร้อนไปหมุนกังหันเพื่อกำเนิดกระแสไฟฟ้า ในปี พ.ศ.2560 พบว่ามีการใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า 23.62% จากเชื้อเพลิงทั้งหมดเป็นตัวเลขถึง 15.9 ล้านตัน [1, 2] เหตุผลที่มีการใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง เนื่องจากมีราคาถูกและสามารถเก็บสำรองได้ ทำให้สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ต่อเนื่อง แต่ข้อเสียที่ตามมาคือเรื่องของมลพิษจากควันและของเสียที่ออกมาในรูปแบบขี้เถ้า

ในการเผาถ่านหินจะเกิดเถ้าซึ่งจัดเป็นของเสียที่ต้องนำไปกำจัดให้ถูกต้องตามกฎหมาย ถ่านหินที่นิยมใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้าคือ ถ่านหินลิกไนต์ และบิทูมินัส งานวิจัยนี้สนใจถ่านหินบิทูมินัส เนื่องจากเป็นถ่านหินที่สะอาดและมีอัตราส่วนของเพอริกออกไซด์สูงที่สุด

โรงไฟฟ้าพลังงานถ่านหินบิทูมินัส GHECO-one ของกลุ่มบริษัท โกลว์ กรุ๊ป จำกัด ที่อำเภอมาบตาพุด จังหวัดระยอง มีเถ้าถ่านหินผลิตออกมาปีละกว่า 2 แสนตัน แบ่งเป็นเถ้าลอย 90 % และเถ้าหนัก 10 % จัดเป็นขยะทางอุตสาหกรรมที่ไม่ก่อให้เกิดมูลค่าและยังต้องเสียค่าใช้จ่ายในการกำจัด โดยทั่วไปเถ้าถ่านหินจะถูกนำไปใช้งานในการถมดิน ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตซีเมนต์ และการทำถนน อย่างไรก็ตามปริมาณที่ถูกนำไปใช้ยังคงไม่เพียงพอต่อปริมาณเถ้าที่เกิดขึ้น จึงเริ่มมีการศึกษาวิจัยทดลองนำเถ้าสองชนิดนี้ไปประยุกต์ใช้งาน เช่น ผสมใช้แทนคอนกรีต จีโอฟิลเลอร์ ผสมในกระเบื้อง และใช้ผสมกับดินเพื่อขึ้นรูปเป็นอิฐ [2-5]

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงนำเถ้าถ่านหินบิทูมินัสมาใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องปั้นดินเผา เนื่องจากพบว่าองค์ประกอบของทั้งเถ้าลอยและเถ้าหนักมีความคล้ายคลึงกับวัสดุตัวเดิมในอุตสาหกรรมดังกล่าว เช่น ซิลิกาไดออกไซด์ และอะลูมิเนียมออกไซด์ นอกจากนี้ยังมีเพอริกออกไซด์ซึ่งจะช่วยเพิ่มความแข็งแรงและเม็ดสีแดงให้กับผลิตภัณฑ์จำพวกอิฐดินเผาก่อสร้าง ทำให้อิฐมีคุณภาพที่ดีขึ้น

ผลิตภัณฑ์เซรามิกที่มีความเป็นไปได้ที่จะนำเถ้าถ่านหินบิทูมินัสไปใช้มีหลายผลิตภัณฑ์ แต่ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยสนใจผลิตภัณฑ์เครื่องปั้นดินเผา 3 ชนิด ได้แก่ โอ่ง อิฐดินเผาก่อสร้าง และกระเบื้องปูพื้นบุผนัง ซึ่งมาจาก 5 กลุ่มโรงงานอุตสาหกรรม ได้แก่ กลุ่มอุตสาหกรรมเครื่องปั้นดินเผาโอ่งมังกร

จังหวัดราชบุรี กลุ่มเครื่องปั้นดินเผาจังหวัดราชบุรี กลุ่มอิฐดินเผาก่อสร้างจังหวัดอ่างทอง กลุ่มอิฐดินเผาก่อสร้างจังหวัดชลบุรี และกลุ่มกระเบื้องเซรามิกจังหวัดสระบุรี

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาการนำเถ้าถ่านหินบิทูมินัสมาใช้ในงานทางการเซรามิกเครื่องปั้นดินเผา โดยมีความแข็งแรง การหดตัว และการดูดซึมน้ำใกล้เคียงหรือดีกว่าเทียบกับชิ้นงานที่อ้างอิงสูตรมาตรฐานตามโรงงานอุตสาหกรรม จนได้สูตรส่วนผสมที่คิดว่ามีความเป็นไปได้ที่จะนำไปใช้งานได้จริง

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

ศึกษาสมบัติการหดตัวเมื่อแห้ง การหดตัวหลังเผา การดูดซึมน้ำ ความแข็งแรง สี รวมไปถึงศึกษาโครงสร้างจุลภาค และองค์ประกอบเฟสหลังเผาของชิ้นงานดินผสมกับเถ้าลอยและเถ้าหนักบิทูมินัส โดยเปลี่ยนแปลงสัดส่วนระหว่างดินกับเถ้าและอุณหภูมิที่ใช้เผา เพื่อหาสูตรที่มีความเป็นไปได้ว่าจะสามารถนำไปใช้ในเชิงอุตสาหกรรมได้

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้สูตรส่วนผสมเนื้อผลิตภัณฑ์เซรามิกดินเผาที่มีเถ้าถ่านหินบิทูมินัสเป็นส่วนผสมโดยชิ้นงานที่ได้มีสมบัติเทียบเท่ากับผลิตภัณฑ์ในอุตสาหกรรม

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ถ่านหิน

ถ่านหินเป็นทรัพยากรตามธรรมชาติอย่างหนึ่งที่สามารถพบได้ในหลายพื้นที่ทั่วโลก ประกอบด้วยคาร์บอนไม่น้อยกว่า 40 wt% เกิดจากการทับถมตัวของซากพืชที่ย่อยสลายตัวอยู่ตามแหล่งน้ำหรือตามพื้นที่ลุ่มเป็นเวลาหลายล้านปี ทำให้ซากพืชเกิดการแปรสภาพกลายเป็นถ่านหินที่สามารถติดไฟได้ มีสีแตกต่างกันขึ้นอยู่กับปริมาณคาร์บอนภายในซึ่งจะส่งผลต่อปริมาณความร้อนที่ได้จากการเผา กล่าวคือหากถ่านหินมีปริมาณคาร์บอนสูง จะทำให้ค่าความร้อนที่ได้หลังการเผาสูงเช่นกัน ความร้อนดังกล่าวอาจถูกนำไปใช้งานต่อตั้ง เช่น นำไปต้มน้ำให้เดือดเพื่อเกิดไอน้ำนำไปหมุนใบพัดเพื่อกำเนิดกระแสไฟฟ้า เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีความชื้น และปริมาณซัลเฟอร์ต่างกัันดัง ตารางที่ 2.1 ถ่านหินแบ่งได้เป็น 5 ชนิด ได้แก่ พีต ลิกไนต์ ซับบิทูมินัส บิทูมินัส และแอนทราไซต์ดัง รูปที่ 2.1 [6]



รูปที่ 2.1 ประเภทของถ่านหิน [7]

2.1.1 พีต (Peat)

บางครั้งเรียกถ่านพีตเป็นถ่านหินที่มีปริมาณคาร์บอนน้อยกว่า 40 wt% ซึ่งจัดเป็นถ่านหินที่มีปริมาณคาร์บอนน้อยที่สุด มีความชื้นสูงมาก อาจมองเห็นเป็นกิ่งก้านหรือลำต้นได้ด้วยตาเปล่า มีสีน้ำตาลจนถึงสีดำ มีกำมะถันต่ำ หากเผาจะให้ความร้อนต่ำ มีเถ้าและควันออกมาปริมาณมาก ไม่นิยมนำมาใช้งานเป็นเชื้อเพลิงเท่าใดนัก [8]

2.1.2 ลิกไนต์ (Lignite)

ถ่านหินชนิดนี้ซากพืชจะสลายตัวหมด มีปริมาณคาร์บอน 40-55 wt% มีสีน้ำตาลเข้มจนออกดำ มีความชื้นสูง ลิกไนต์สามารถพบได้ในประเทศไทยบริเวณตอนเหนือของประเทศไทย โดยเฉพาะอำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ซึ่งมีเหมืองขนาดใหญ่และมีโรงไฟฟ้าที่ใช้ถ่านหินลิกไนต์ในการผลิตกระแสไฟฟ้าอยู่แหล่งใหญ่ของประเทศ [8, 9]

2.1.3 ซับบิทูมินัส (Subbituminous)

ถ่านหินชนิดนี้จะมีสีน้ำตาลเข้มจนถึงดำ เนื้อแน่นกว่าลิกไนต์ มีผิวมันและเงา ปริมาณคาร์บอนประมาณ 42-52 wt% มีปริมาณออกซิเจนและความชื้นอยู่ในระดับปานกลางเมื่อเทียบกับถ่านชนิดอื่น [10] สามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าได้ [11]

2.1.4 บิทูมินัส (Bituminous)

บิทูมินัสเป็นถ่านสีดำ มันวาว เนื้อแน่น รูพรุนน้อย เนื้อค่อนข้างนุ่มไม่แข็ง มีปริมาณคาร์บอน 40-80 wt% ไม่มีชั้นส่วนของพืชปรากฏให้เห็นชัดเจน นิยมใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้าเช่นเดียวกับลิกไนต์และซับบิทูมินัส นอกจากจะให้พลังงานความร้อนสูงแล้ว ความเป็นมลพิษยังน้อยกว่าลิกไนต์อีกด้วย แต่มีราคาสูงกว่า ในประเทศไทยมีการนำเข้าถ่านชนิดนี้มากที่สุดเนื่องจากบริเวณแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้มีถ่านที่คุณภาพดี ส่วนใหญ่นำเข้ามาจากประเทศอินโดนีเซีย เวียดนาม พม่า และประเทศอื่น ตามลำดับ [8, 9]

2.1.5 แอนทราไซต์ (Anthracite)

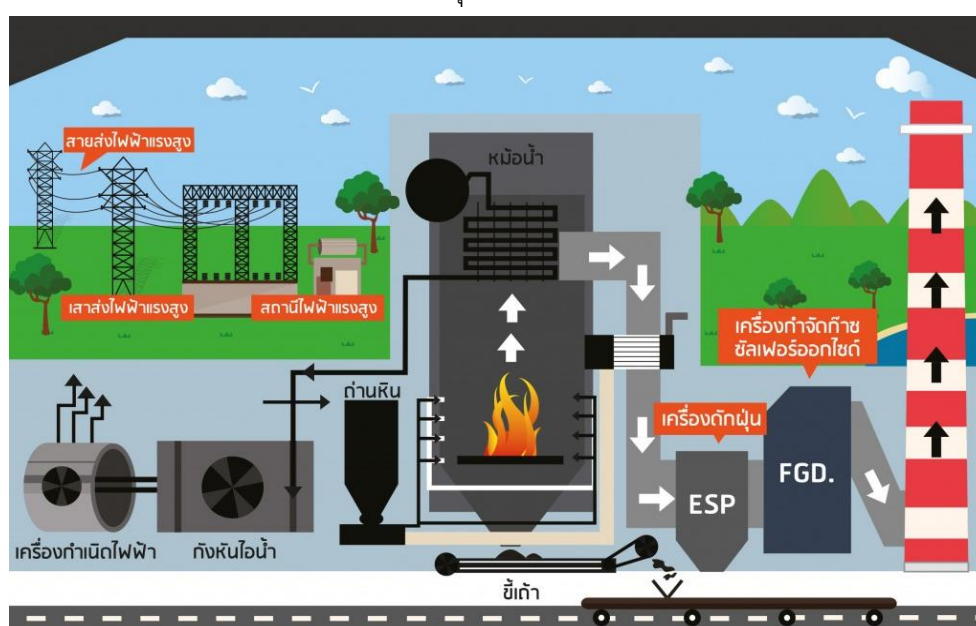
ถ่านหินชนิดนี้มีปริมาณคาร์บอนสูงที่สุดในบรรดาถ่านหินทั้งหมด มีปริมาณ 80-95% มีความชื้นต่ำ ให้ความร้อนสูง จุดไฟติดยาก มีสีดำมันวาว มักใช้เป็นเชื้อเพลิงในอุตสาหกรรมแก้ว และอุตสาหกรรมเคมี เมืองไทยพบถ่านหินชนิดนี้ได้ที่จังหวัดเลย ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ แต่มีปริมาณน้อยมาก [8, 9]

ตารางที่ 2.1 สมบัติของถ่านหินชนิดต่างๆ [10]

ถ่านหิน	ลิกไนต์	ซับบิทูมินัส	บิทูมินัส	แอนทราไซต์
ค่าความร้อน (Btu/lb)	4,000-8,300	8,500-13,000	11,000-15,000	13,000-15,000
ความชื้น	30-60%	10-45%	2-15%	<15%
สัดส่วนคาร์บอน	25-35%	35-45%	45-85%	85-98%
ปริมาณเถ้า	10-50%	<10%	3-12%	10-20%
ปริมาณซัลเฟอร์	0.4-1.0%	<2%	0.7-4.0%	0.6-0.8%

2.2 เถ้าถ่านหิน

งานวิจัยนี้สนใจชี้เถ้าจากการผลิตกระแสไฟฟ้าเนื่องจากเป็นกระบวนการที่ใช้ถ่านหินมากที่สุด ในส่วนของกระบวนการผลิตไฟฟ้าถ่านหินจะถูกนำไปเผาไหม้ในเตาและเผาที่อุณหภูมิสูง ไอร้อนที่ได้จากการเผาจะนำไปใช้ในการต้มน้ำเพื่อให้เกิดไอน้ำไปหมุนกังหันไอน้ำปั่นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า **รูปที่ 2.2** หลังจากจบกระบวนการ จะเกิดของเสียขึ้นหลายชนิดได้แก่ เถ้าถ่านหิน (Coal ash) ตะกรัน (Boiler slag) และของเสียจากการกำจัดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Flue-gas desulphurization) [12] ซึ่งเป็นสารอินทรีย์และอนินทรีย์ที่เผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ในงานวิจัยนี้สนใจกับเถ้าถ่านหินเพราะเป็นของเสียที่มีออกมามากที่สุด



รูปที่ 2.2 โรงไฟฟ้าพลังงานถ่านหิน [13]

ในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้เถ้าถ่านหินจากถ่านหินบิทูมินัสเนื่องจากเถ้าดังกล่าวมีปริมาณเพอริกออกไซด์ (Fe_2O_3) สูงที่สุดเมื่อเทียบกับเถ้าลอยจากถ่านหินแอนทราไซต์ ซับบิทูมินัสและลิกไนต์ ดัง **ตารางที่ 2.2** ซึ่งการมีเพอริกออกไซด์เพิ่มขึ้นในผลิตภัณฑ์เซรามิกเครื่องปั้นดินเผาจะช่วยทำให้ผลิตภัณฑ์มีสีส้มหรือสีแดงอิฐที่เข้มมากขึ้น เถ้าถ่านหินในงานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากโรงงาน GHECO-One จากกลุ่มบริษัท โกลว์ กรุ๊ป จำกัด ที่อำเภอมาบตาพุด จังหวัดระยอง

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยจากถ่านหินในสหรัฐอเมริกา [4]

องค์ประกอบทางเคมี	แอนทราไซต์	บิทูมินัส	ซับบิทูมินัส	ลิกไนต์
SiO ₂	47-68	7-68	17-58	6-45
Al ₂ O ₃	25-43	4-39	4-35	6-23
Fe ₂ O ₃	2-10	2-14	3-19	1-18
CaO	0-4	1-36	2-45	15-44
MgO	0-1	0-4	0.5-8	3-12
Na ₂ O	-	0-3	-	0-11
K ₂ O	-	0-4	-	0-2
SO ₃	0-1	0-32	3-16	6-30

เถ้าถ่านหินแม้จะมีองค์ประกอบทางเคมีใกล้เคียงกัน โดยมักจะมีแร่แมกนีไทต์ ฮีมาไทต์ ควอตซ์ มุลไลต์ และแคลเซียมออกไซด์อิสระ [4] แต่จะมีลักษณะภายนอกและกระบวนการเก็บรวบรวมแตกต่างกัน ข้อมูลจากสำนักบริหารจัดการกากอุตสาหกรรม กรมโรงงานอุตสาหกรรม ระบุว่าเถ้าถ่านหินไม่จัดว่าเป็นข้อเสียอันตราย ดังนั้นจึงปลอดภัยต่อการนำมาใช้งาน [14] สามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิดหลัก ได้แก่ เถ้าลอย และเถ้าหนัก

2.2.1 เถ้าลอย

ในการเผาถ่านหินจะมีเถ้าบางส่วนจะลอยขึ้นสู่ด้านบนของเตาและจะถูกจับด้วยกระบวนการไฟฟ้าสถิต (Electrostatic) เถ้าที่มีอนุภาคขนาดเล็ก ละเอียด ซึ่งเกิดจากการเผาเชื้อเพลิงของแข็งจำพวกถ่านหิน โดยพบว่าจะมีปริมาณ 10-85 % จากของเสียทั้งหมด มักจะมีลักษณะเป็นทรงกลม น้ำหนักเบา ละเอียด มีขนาดอยู่ในช่วง 0.5-100 ไมครอน สีแทนออกน้ำตาลอ่อนขึ้นอยู่กัปริมาณคาร์บอนของถ่าน **รูปที่ 2.3** [3] เถ้าลอยสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทตามมาตรฐาน ASTM C618 ได้แก่ คลาส F และ คลาส C

คลาส F จะต้องมึปริมาณซิลิกา อะลูมินาและเฟอริกออกไซด์ (SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃) รวมมากกว่า 70 % ตามมาตรฐานของ ASTM C618 [15] (50 % สำหรับคลาส C) ส่วนเงื่อนไขอื่นจะเหมือนกันทั้งคลาส F และ C ได้แก่ ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์น้อยกว่า 5% ความชื้นน้อยกว่า 3% และค่าการปริมาณสารอินทรีย์และน้ำหนักที่สูญเสียหลังเผา (Loss on Ignition) น้อยกว่า 6%



รูปที่ 2.3 เถ้าลอยบิทูมินัส

2.2.2 เถ้าหนัก

เถ้าหนักเป็นของเสียที่ได้จากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ของถ่านหินที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ รวมกับเถ้าขนาดเล็กอื่นๆ ที่เกาะตัวรวมกันจนมีน้ำหนักมาก โดยเถ้าหนักจะอยู่บริเวณด้านล่างของเตาเผาที่เป็นอ่างน้ำ เถ้าหนักมีประมาณ 10-20 % ของเถ้าที่เกิดขึ้นทั้งหมด ลักษณะเป็นเม็ดหยาบ ขนาดใหญ่กว่าเถ้าลอย สีเทาเข้มไปจนถึงสีดำ รูปที่ 2.4 [3, 16]



รูปที่ 2.4 เถ้าหนักบิทูมินัส

2.2.3 การนำเถ้าไปใช้ประโยชน์

เนื่องจากเถ้าลอยและเถ้าหนักจัดเป็นของเสียจากโรงไฟฟ้า ดังนั้นจึงต้องมีการนำไปกำจัดหรือใช้งานในด้านอื่น เช่น การนำเถ้าลอยไปเป็นดินสำหรับใช้งานทางสถาปัตยกรรม การใช้เถ้าลอยผสมกับดินสำหรับเพาะปลูกพืชในพื้นที่แห้งแล้ง การนำเถ้าหนักไปใช้ผสมในยางมะตอย

อย่างไรก็ตาม การนำไปใช้งานดังกล่าวอาจยังไม่เพียงพอต่อปริมาณเถ้าที่เกิดขึ้น ดังนั้นจึงเริ่มมีนักวิจัยได้ทำการทดลองนำเถ้าทั้งสองชนิดไปใช้งานทางด้านเซรามิกมากขึ้น ไม่ว่าจะเป็นด้านซีเมนต์หรือเครื่องปั้นดินเผา [3, 4, 16] ซึ่งในงานวิจัยนี้จะนำไปประยุกต์ใช้ในด้านเซรามิกเครื่องปั้นดินเผาผสมทดแทนวัตถุดิบผสมดั้งเดิมจาก 5 กลุ่มอุตสาหกรรมเซรามิก ได้แก่ กลุ่มอุตสาหกรรมเครื่องปั้นดินเผาอ่างมั่งกรจังหวัดราชบุรี กลุ่มเครื่องปั้นดินเผาจังหวัดจันทบุรี กลุ่มอิฐดินเผาก่อสร้างจังหวัดอ่างทอง กลุ่มอิฐดินเผาก่อสร้างจังหวัดชลบุรี และกลุ่มกระเบื้องเซรามิกจังหวัดสระบุรี

2.3 ที่มา ประวัติพอสังเขป และแนวทางการนำไปประยุกต์ใช้

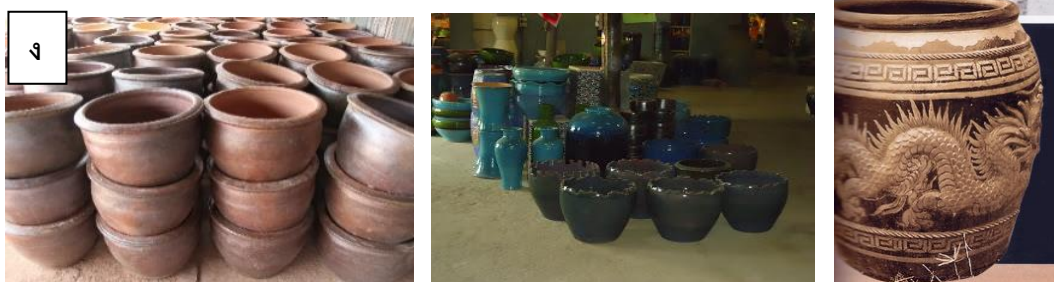
2.3.1 กลุ่มอุตสาหกรรมเครื่องปั้นดินเผาโอ่งมังกรจังหวัดราชบุรี

โอ่งมังกรราชบุรีเป็นเครื่องปั้นดินเผาชนิดเคลือบซี้เถ้า สีสอกน้ำตาลเข้มปนเขียว มีลวดลายอันโดดเด่นคือลายมังกรอันเป็นที่มาของชื่อโอ่งลายมังกรนั่นเอง มีการทำครั้งแรกในปี พ.ศ. 2477 โดยนายจื่อเหม็ง เป็นช่างจากเมืองจินเตินทางมาที่ประเทศไทยและพบว่าดินเหนียวที่จังหวัดราชบุรีมีสีส้มออกเหลือง เมื่อเผาแล้วให้สีที่สวยงามจึงตัดสินใจเปิดโรงงานภายใต้ชื่อ “เถ้าเซ่งหลี” โดยมีความเชื่อว่ามังกรเป็นเหมือนเทพเจ้าที่คอยปกครองและคุ้มครองชาวจีน ลายดังกล่าวได้รับความนิยมอย่างมากจนเป็นที่เลื่องชื่อในจังหวัดและกระจายไปยังทั่วประเทศ [17] ลักษณะของโอ่งมังกรจะเป็นเครื่องปั้นดินเผาที่มีเนื้อแกร่ง ไม่ซึมน้ำ มีความแข็งแรง ดินที่นำมาใช้จะมาจากบริเวณลุ่มแม่น้ำแม่กลองซึ่งมีแร่เหล็กปะปนอยู่มาก ดินบริเวณนี้จะมีการทับถมกันของทราย กรวดและดินเหนียว อนุภาคขนาดเล็กที่แม่น้ำพัดมาสะสมตัว นิยมขุดเปิดหน้าดินช่วงฤดูแล้งลึกลงไปประมาณ 3-4 เมตร ที่ระดับความลึกดังกล่าวจะมีดินที่นิยมใช้อยู่ 2 ชนิด ได้แก่ ดินสีชมพูแดงหรือเรียกว่าสีมันปู ดินดังกล่าวจะประกอบไปด้วยแร่ควอตซ์เป็นหลัก ร่องลงมาเป็นเคโอลิไนต์ อิลไลต์และมอนต์มอริลโลไนต์ จากการทดลองดินสีมันปูจะมีการหดตัวน้อยกว่าดินอีกชนิดหนึ่งซึ่งจะมีสีเหลืองเทา ดินสีเหลืองเทาสามารถใช้ในการผลิตโอ่งได้เช่นกันโดยจะมีองค์ประกอบทางเคมีคล้ายกับดินสีมันปู ต่างกันตรงที่ไม่มีมอนต์มอริลโลไนต์ แต่มีแร่สเมกไทต์ในปริมาณน้อยแทน [18]

ในการทำโอ่งจะนำดินเหนียวกับทรายประมาณ 10-15 wt% หมักทิ้งไว้เป็นเวลา 3 วัน จากนั้นนำไปโมหรือเครื่องนวดผสมแล้วขึ้นรูปด้วยแป้นหมุน (Throwing) ดังใน **รูปที่ 2.5** ขึ้นรูปไล่จากฐาน ลำตัว และขอบปากโอ่ง ใช้เวลาแต่ละขั้นตอนประมาณครึ่งชั่วโมงเพื่อให้ดินหมาด จากนั้นตบด้วยไม้ต้ำและชู่หลุบ ตกแต่งผิวทั้งด้านนอกและด้านในเพื่อให้เรียบ ได้รูปทรงที่ต้องการ เขียนลายมังกรด้วยดินขาวทันทึ ไม่ควรทิ้งให้โอ่งแห้ง เคลือบด้วยน้ำเคลือบที่ผสมโคลนและซี้เถ้าให้มันเงา ใช้ทรายรองเตาหนาประมาณ 20-30 เซนติเมตรเพื่อป้องกันความชื้นจากพื้นดิน เเผาที่อุณหภูมิประมาณ 1200 °C ประมาณ 22 ชั่วโมง จะได้โอ่งที่มีการดูดซึมน้ำต่ำ ในงานวิจัยนี้จะใช้ดินเหนียวราชบุรีจากโรงงานโอ่งอุดมดินไทยผสมเถ้าลอยและเถ้าหนักบิทูมินัส 10, 15 และ 20 wt% ซึ่งส่วนผสมดังกล่าวจะอิงจากสัดส่วนของทรายที่ใช้ในโรงงานซึ่งจะผสมทราย 10 wt% กอปรกับผลิตภัณฑ์โอ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความเหนียวของเนื้อดินในระดับหนึ่ง จึงผสมเถ้าไม่มากเพื่อให้เนื้อดินยังคงเหนียวขึ้นรูปได้ง่าย [18-21] ทรายแม่น้ำที่ใช้มาจากโรงงานโอ่งอุดมดินไทย



รูปที่ 2.5 ก) การเตรียมดิน ข) การขึ้นรูปโถ่ง ค) การเผาโถ่งในเตา และ ง) โถ่งสำเร็จรูปพร้อมใช้งาน
[19-22]



รูปที่ 2.5 ก) การเตรียมดิน ข) การขึ้นรูปโถ่ง ค) การเผาโถ่งในเตา และ ง) โถ่งสำเร็จรูปพร้อมใช้งาน [19-22] (ต่อ)

2.3.2 กลุ่มเครื่องปั้นดินเผาจังหวัดจันทบุรี

เครื่องปั้นดินเผาในจังหวัดจันทบุรีเริ่มต้นจากคนจีนแคะเดินเรือมาตามคลองและแม่น้ำวังโตนดในช่วงต้นกรุงรัตนโกสินทร์ จากนั้นเลือกตั้งถิ่นฐานบริเวณคลองรำพันเนื่องจากบริเวณดังกล่าวมีสิ่งแวดล้อม สภาพภูมิประเทศดี มีคลองด้านหน้าสำหรับคมนาคมติดต่อกับชุมชนหรือค้าขายกับต่างจังหวัด รูปที่ 2.6 มีแนวเทือกเขาจันทบุรีและผืนดินอุดมสมบูรณ์สำหรับทำไร่และผลิตเครื่องปั้นดินเผา คนจีนที่เริ่มต้นทำโถ่งซึ่งมีชื่อเสียงชื่อนายแปะสุน แซ่ไคว้ทำโถ่งด้วยการใช้ดินท้องถิ่นเคลือบด้วยซีเถ้าและน้ำดินเลน จากนั้นได้นายก้วน แซ่ตั้งเข้ามารับช่วงต่อจนสร้างเตาเผา สร้างโรงงานผลิตด้วยตัวเอง ผลิตภณัฑ์ที่ผลิตได้แก่ ถ้วยรองน้ำยาง โถ่ง อ่าง กระถาง และอิฐ ต่อมาลูกชายชื่อนายวิจิตร หัตถวิจิตรกุล สร้างโรงงานกระเบื้องดินเผาเด่นจันทร์ขึ้นมาในปี พ.ศ. 2519 นายวิจิตรมีน้องชายชื่อนายฉิ้น เซบาน ซึ่งนายฉิ้นได้มีโอกาสไปทำงานเกี่ยวกับโถ่งที่จังหวัดตราขบุรีแล้วกลับมาช่วยงานครอบครัวที่จังหวัดจันทบุรีต่อจึงทำให้โถ่งจันทบุรีมีความคล้ายคลึงกับโถ่งตราขบุรี ลูกหลานของนายฉิ้นซึ่งเติบโตมากับการทำเครื่องปั้นดินเผาจึงตัดสินใจตั้งโรงงาน “ตั้งเจริญเครื่องปั้นดินเผา” และ “สมบัติดินเผา” สืบมาจนถึงปัจจุบัน [23]



รูปที่ 2.6 ตำแหน่งของบ้านเตาหม้อตัวเมืองจันทบุรี [23]

นอกจากนี้ยังมีนายเปี้ยง แซ่ตัน เป็นชาวจีนแคะเช่นเดียวกันเคยเป็นช่างปั้นอยู่ที่โรงงานบ้านเตาหม้อซึ่งภายหลังลูกชายของนายเปี้ยง ชื่อนายฮับได้เปิดโรงงานขึ้นในปี พ.ศ. 2488 ผลิตโอ่งลายปูของตัวเองชื่อ “อันฮวดเส็ง” หรือปัจจุบันชื่อ “เจริญชัยดินเผา” ในการขนส่งโอ่งระยะแรกจะขนส่งทางเรือล่องไปน้ำแม่น้ำและริมชายฝั่งทะเลตั้งแต่ประแส แกลง บ้านเพ ระยองและกรุงเทพฯ ทำให้ชาวจีนแคะที่มาสสร้างเนื้อสร้างตัวที่บริเวณนี้มีรายได้ และสามารถทำให้อ่องจันทบุรีมีชื่อเสียงแพร่หลายไปยังหลายจังหวัดในประเทศได้ ลวดลายของโรงงานนี้จะเน้นเป็นสัตว์มงคลของจีนและมีการดัดแปลงทำสีที่เป็นเอกลักษณ์อย่างสีเดียวไขกานใน ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ของโรงงานแสดงใน

รูปที่ 2.7 ปัจจุบันผลิตถ้วยรองน้ำยางแทนโอ่งเนื่องจากขาดแคลนช่างฝีมือ [24]



รูปที่ 2.7 เครื่องปั้นดินเผาจังหวัดจันทบุรี [23, 24]

ในงานวิจัยนี้จะใช้ดินเหนียวจันทบุรีจากโรงงานตั้งเจริญเครื่องปั้นดินเผา มาผสมกับเถ้าลอยและเถ้าหนักทดแทนในทราย ในอัตราส่วน 0-20 wt% คล้ายกับสูตรของโอ่งราชบุรี เนื่องจากมีความคล้ายคลึงกันในด้านส่วนผสมและกระบวนการผลิต หากผลิตภัณฑ์จากส่วนผสมดังกล่าวมีความใกล้เคียงหรือดีกว่าผลิตภัณฑ์จากสูตรของโรงงานจะมีการนำไปประยุกต์ใช้กับสูตรของถ้วยรองน้ำยาง และผลิตภัณฑ์อื่นในอนาคต ชิ้นงานที่ผสมเถ้าจะนำมาเทียบสมบัติกับชิ้นงานสูตรอ้างอิงที่ผสมทรายแม่น้ำ 10 wt% โดยจะใช้ทรายจากโรงงานโอ่งอุ้มดินไทย

2.3.3 กลุ่มอิฐดินเผาก่อสร้างจังหวัดอ่างทอง

อิฐดินเผาก่อสร้างจังหวัดอ่างทองนั้นมักจะเป็นอิฐมอญ ซึ่งเกิดจากในสมัยกรุงศรีอยุธยา มีชาวมอญอพยพเข้ามาอยู่อาศัย ลงหลักปักฐานและได้เริ่มสร้างที่อยู่อาศัยของตนโดยการนำอิฐชนิดหนึ่งที่ชาวมอญใช้เป็นประจำมาสร้าง ชาวไทยในสมัยนั้นจึงเรียกอิฐชนิดนี้ว่าอิฐมอญ อิฐชนิดนี้ถูกนำไปใช้งานอย่างแพร่หลายโดยเฉพาะการสร้างอาคารบ้านเรือน โบราณสถาน อาทิ วัดพระศรีสรรเพชญ์ รูปที่ 2.8 และมีการใช้เรื่อยมาจนถึงปัจจุบัน



รูปที่ 2.8 วัดพระศรีสรรเพชญ์จังหวัดพระนครศรีอยุธยา สร้างด้วยอิฐมอญ [25]

อิฐมอญจะมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า สีส้มอ่อนไปจนถึงสีส้มเข้มขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและองค์ประกอบของดินที่นำมาใช้ โดยจะนำดินท้องถิ่นริมแม่น้ำซึ่งจะมีความละเอียดกว่าดินบริเวณอื่น ในปัจจุบันได้มีการเปลี่ยนมาใช้ทรายที่ลุ่มแม่น้ำแทนเนื่องจากมีราคาต่ำกว่าและมีสมบัติใกล้เคียงกัน นำดินที่ขุดมาได้แช่น้ำและหมักไว้ 2-3 วันให้ดินเข้าที่ จากนั้นผสมกับทราย ชี้เถ้า และแกลบ รูปที่ 2.9 ก) แล้วนำใส่เครื่องอัดรีดออกมาแล้วตัดเป็นก้อนตามขนาดที่ต้องการ ซึ่งอิฐที่มีรูจะมีการใช้เครื่องมือที่ทันสมัยกว่าสำหรับช่วยเจาะรู ง่ายต่อการเสียบเหล็กเข้าไปเพื่อขึ้นเป็นเค้าโครงและช่วยลดอุณหภูมิในบ้านได้เล็กน้อย อิฐที่ผ่านเครื่องอัดรีดมาแล้วจะถูกนำไปตากแดดประมาณ 3-10 รูปที่ 2.9 ข) วันแล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิประมาณ 900-1000 °C ระยะเวลาประมาณ 7-10 วัน เตาเผาที่มีลักษณะเป็นโดมขนาดใหญ่ รูปที่ 2.10 โดยต้องมีการเว้นช่องเพื่อให้ไฟสามารถเข้าไปเผาอิฐได้อย่างทั่วถึง ตั้งอิฐให้ตรงและสมมาตรเพื่อป้องกันอิฐล้า ในการเผาจะใช้แกลบเพื่อเป็นเชื้อเพลิง ชี้เถ้าหลังจากเผาสามารถนำไปใช้งานต่อในการเผาอบต่อไปได้ [26, 27]



รูปที่ 2.9 ขั้นตอนการผลิตอิฐมอญ ก) การเผอิฐมอญด้วยแกลบ และ ข) การตากอิฐ [28]

ในงานวิจัยนี้จะใช้ดินเหนียวอ่างทองจากบริษัท อ.ป.ก. ดาวคู่ จำกัด ผสมเถ้าหนักและเถ้าลอยใช้ทดแทนทรายในอัตราส่วน 10 20 30 และ 40 wt% เนื่องจากอิฐไม่ต้องการการดูดซึมน้ำต่ำ จึงทดลองใส่เถ้าในปริมาณที่สูงขึ้นเพื่อเป็นการใช้ของเสียให้ได้มากที่สุด เทียบกับชิ้นงานสูตรอ้างอิงที่ผสมทรายแม่น้ำ 10 wt% ใช้ทรายจากโรงงานโองอุทุมดินไทย

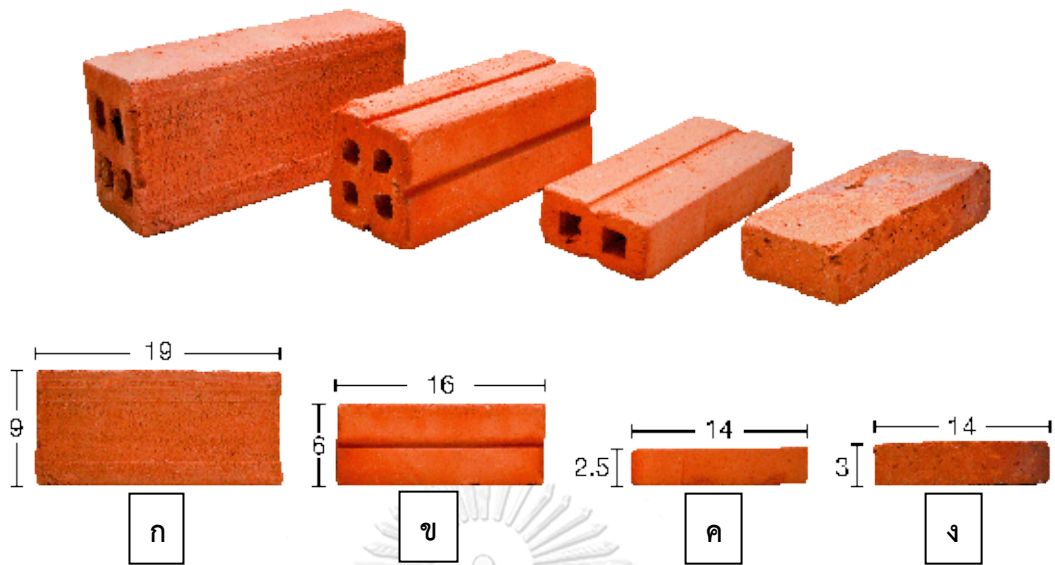


รูปที่ 2.10 อิฐดินเผาก่อสร้างจังหวัดอ่างทองและภาพเตาเผาทรงโดม

2.3.4 กลุ่มอิฐดินเผาก่อสร้างจังหวัดชลบุรี

จุดเริ่มต้นในการผลิตอิฐดินเผาก่อสร้างหรือเรียกสั้นๆ ว่า “อิฐแดง” ในจังหวัดชลบุรีจะอยู่ที่ตลาดปูนเถ้าม้า หมู่ 4 ตำบลหนองกะขะ อำเภอบ้านนาเมือง จังหวัดชลบุรี รูปที่ 2.11 ห่างจากอำเภอมืองประมาณ 18 กิโลเมตร บริเวณดังกล่าวอยู่ใกล้กับคลองบางไผ่และคลองยางน้อย ดินจึงเป็นดินลุ่มแม่น้ำที่มีความละเอียดและเหนียวเหมาะแก่การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เครื่องปั้นดินเผา บุคคลที่เป็นผู้ริเริ่มคือนายเจ๊กน้ำเริ่มผลิตอิฐแดงโดยใช้ดินในท้องถิ่นและแรงงานในชุมชนช่วยกันสร้างโรงงานผลิตอิฐ เพื่อใช้แทนวัสดุก่อสร้างโดยเฉพาะไม้ เนื่องจากอิฐมีความแข็งแรงและคงทน ทำให้ได้รับความนิยมจนโรงงานขยายตัวและมีชื่อเสียงไปทั่วประเทศ

จุดเด่นของอิฐแดงอำเภอบ้านนาเมืองคือ มีความแข็งแรงทนทานจนได้คำขวัญอำเภอกว่า “เมืองอิฐแกร่ง” เมื่อนำอิฐมากระทบกันจะได้ยินเสียงดังกังวาล โดยอิฐในสมัยก่อนจะคัดจากดินเหนียวในพื้นที่ไม่มีการผสมแกลบหรือทราย (แต่ในปัจจุบันมีการผสมทรายประมาณ 10 wt% เพื่อให้ขึ้นรูปได้ง่ายขึ้น) เมื่อคัดดินได้แล้วจะนำมาผสมกับน้ำหมักทิ้งไว้แล้วเข้าเครื่องบดให้เป็นเนื้อเดียวกันจนเหนียว



รูปที่ 2.12 ก) อิฐมอญเคเค ข) อิฐมอญใหญ่ 4 รู ค) อิฐมอญใหญ่ 2 รู และ ง) อิฐมอญต้นก่อเล็ก [31]



รูปที่ 2.13 ภาพเตาเผารูปทรงโดมสำหรับการเผาอิฐดินเผาก่อสร้างจังหวัดชลบุรี [30]

2.3.5 กลุ่มกระเบื้องเซรามิกจังหวัดสระบุรี

ในงานวิจัยนี้จะสนใจกระเบื้องจากอำเภอหนองแค ซึ่งเป็นอำเภอที่มีโรงงานอุตสาหกรรมอยู่เป็นจำนวนมาก และมีโรงงานผลิตกระเบื้องหลายแห่ง ในการผลิตกระเบื้องจะใช้ดินจากจังหวัดปราจีนบุรีผสมกับหินฟันม้าหรือหินผุเพื่อช่วยในการสุกตัว โดยจะนำวัตถุดิบทุกอย่างมาผสมกับน้ำให้เป็นเนื้อเดียวกัน นำไปกรองผ่านตะแกรง จากนั้นนำไปอบให้แห้งแล้วบดจนได้ขนาดที่ต้องการ หรือบางโรงงานอาจใช้เครื่องพ่นแห้ง (Spray dryer) พ่นน้ำดินผสมให้ออกมาเป็นหยด มีขนาดเล็กในหอบพ่นแห้ง จนได้เป็นผงดินแห้ง เมื่อได้ดินผสมมาแล้วจะนำไปเข้าเครื่องอัดโดยมีทั้งเครื่องแบบชนิด

ชั้นเคลือบซึ่งจะนิยมใช้กับกระเบื้องที่มีรูปร่างพิเศษ แต่ถ้าเป็นกระเบื้องปกติจะนิยมใช้เครื่องแบบไฮดรอลิกแบบ 2 จังหวะ จังหวะแรกเพื่อไล่อากาศออกจากกระเบื้อง และจังหวะที่สองจะทำให้กระเบื้องแน่นตัวมากขึ้น โดยเครื่องดังกล่าวสามารถอัดกระเบื้องหลายแผ่นพร้อมกันได้ กระเบื้องจะถูกเผาที่อุณหภูมิประมาณ 1150 °C ประมาณ 1 ชั่วโมง จากนั้นจึงนำออกจากเตาเตรียมจำหน่าย [32]



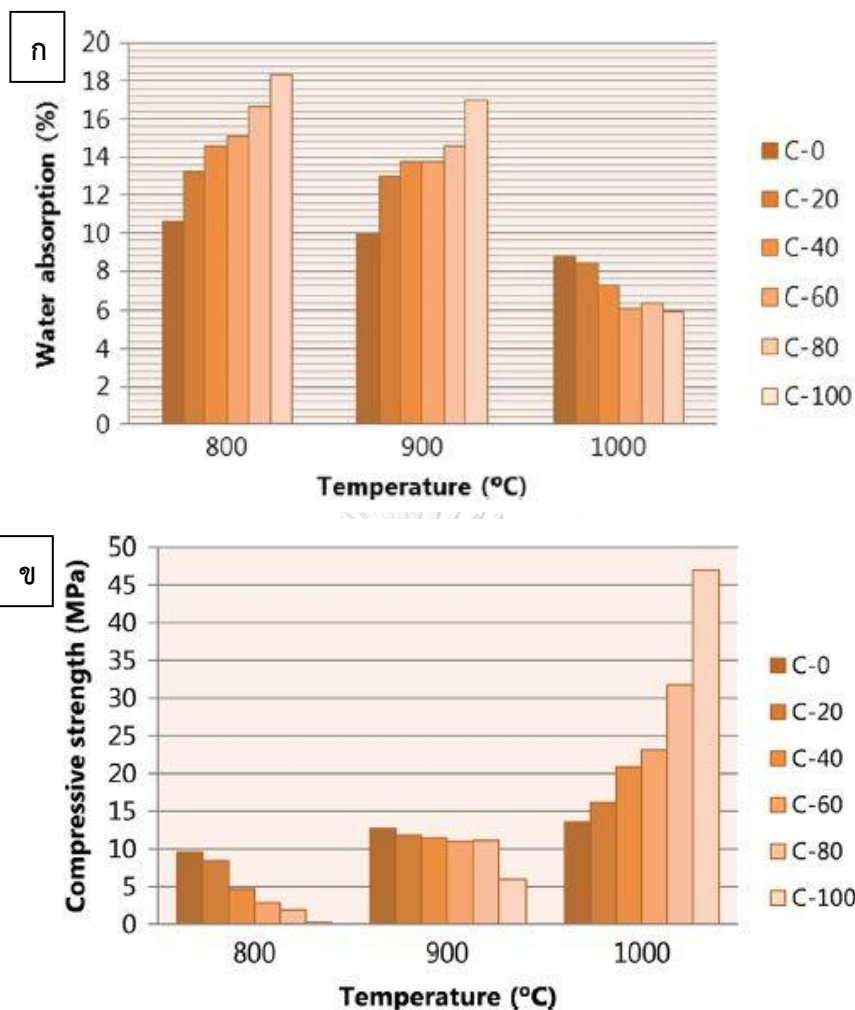
รูปที่ 2.14 กระเบื้องดินเผาจังหวัดสระบุรี

งานวิจัยนี้จะทดลองใช้ดินดำปราจีนบุรีจากบริษัท บีเซน จำกัด ผสมเถ้าหนักและเถ้าลอยทดแทนหินผุในกระบวนการขึ้นรูปกระเบื้อง โดยจะผสมกับดินจากจังหวัดปราจีนบุรีในอัตราส่วน 40, 50 และ 60 wt% ขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดด้วยไฮดรอลิก ทำเป็นกระเบื้องเปล่าแบบไม่เคลือบ จากนั้นจึงนำไปทดสอบเพื่อเทียบกับสูตรส่วนผสมอ้างอิงจากโรงงาน โดยจะใช้หินผุจากบริษัท ซีเบล ไก้มีเนอร์ลิสส์ (ประเทศไทย) จำกัด

2.4 ผลงานวิจัยอื่นที่เกี่ยวข้อง

C. Leiva และคณะ [33] ได้ทดลองนำเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้ามาผสมกับดินจากธรรมชาติ อัตราส่วนของเถ้าลอยตั้งแต่ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 wt% ใช้น้ำเป็นตัวประสาน ขึ้นรูปเป็นแท่งกลมยาว 32.5 มม. เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มม. ด้วยความดัน 10 เมกะพาสคัล จากนั้นเผาที่อุณหภูมิ 800, 900 และ 1000 °C เผายืนไฟ 8 ชั่วโมง จากผลการทดสอบการดูดซึมน้ำและความแข็งแรง

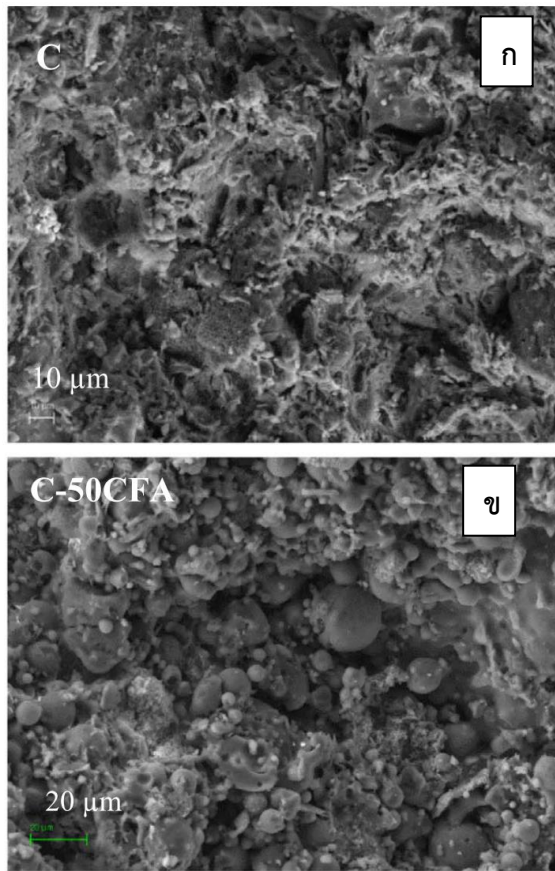
รูปที่ 2.15 พบว่าการผสมเถ้าลอยในอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้น จะมีผลทำให้ค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นและค่าความแข็งแรงต่อการกดลดลงเมื่อเผาที่อุณหภูมิ 800 และ 900 °C แต่การเผาที่อุณหภูมิ 1000 °C แนวโน้มค่าการดูดซึมน้ำจะลดลง และความแข็งแรงต่อการกดจะสูงขึ้นเมื่ออัตราส่วนของเถ้าลอยสูงขึ้น อย่างไรก็ตามชิ้นงานที่ผสมเถ้าลอยอัตราส่วนต่างๆ เมื่อเผาที่ 900 และ 1000 °C มีความเป็นไปได้ที่จะนำไปใช้งานจริง เนื่องจากค่าการดูดซึมน้ำต่ำกว่า 15% ซึ่งเป็นค่ามาตรฐานของประเทศอินเดีย และมีค่าความแข็งแรงต่อการกดสูงกว่า 5 เมกะพาสคัล ซึ่งเป็นค่ามาตรฐานยุโรป (EN 771-2)



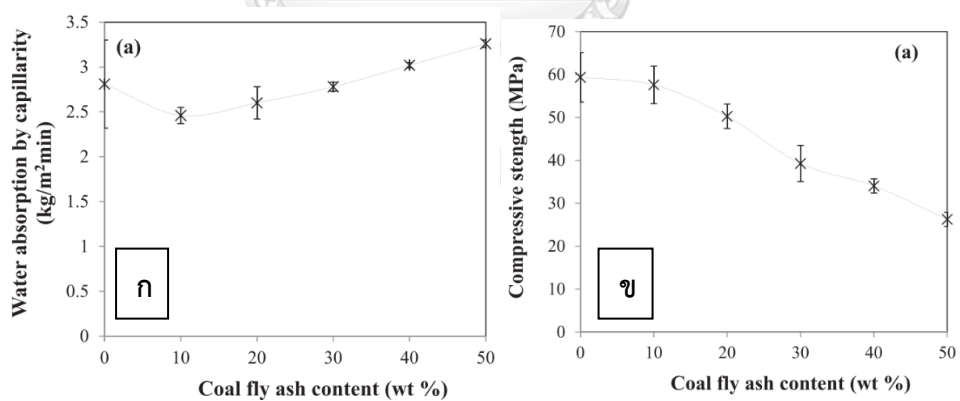
รูปที่ 2.15 ก) ค่าการดูดซึมน้ำ และ ข) ความแข็งแรงต่อการกดของชิ้นงานเมื่อผสมเถ้าลอยอัตราส่วน 0-100% เผาที่อุณหภูมิ 800 900 และ 1000 °C [33]

CHULALONGKORN UNIVERSITY

D. Eliche-Quesada และคณะ [34] ทดลองนำเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้ามาผสมกับดิน โดยผสมเถ้าลอย 10, 20, 30, 40 และ 50% ลงไปในดินที่นิยมใช้ในโรงงานผลิตอิฐ เติมน้ำ 8-10 wt% ผสมอัดขึ้นรูปเป็นก้อนอิฐ อบแห้งที่ 100 °C และเผาที่อุณหภูมิ 1000 °C พบว่าหากสัดส่วนของเถ้าลอยสูงขึ้น ความแข็งแรงต่อการกดและความหนาแน่นลดลง ค่าการดูดซึมน้ำสูงขึ้นเล็กน้อย จากโครงสร้างจุลภาค รูปที่ 2.16 ข) พบว่ายังคงมีอนุภาคของเถ้าลอยเม็ดกลมบางส่วนยังไม่ถูกหลอม รูพรุนที่กระจายอยู่ยังคงเปิดไม่มีอะไรมาหลอมอุด ทำให้ค่าการดูดซึมน้ำสูงขึ้น และความหนาแน่นลดลง อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้พบว่าชิ้นงานที่ผสมเถ้าลอย 10-20% ยังคงมีสมบัติใกล้เคียงกับชิ้นงานอิฐอ้างอิง รูปที่ 2.17 และมีองค์ประกอบทางเคมีใกล้เคียงกัน



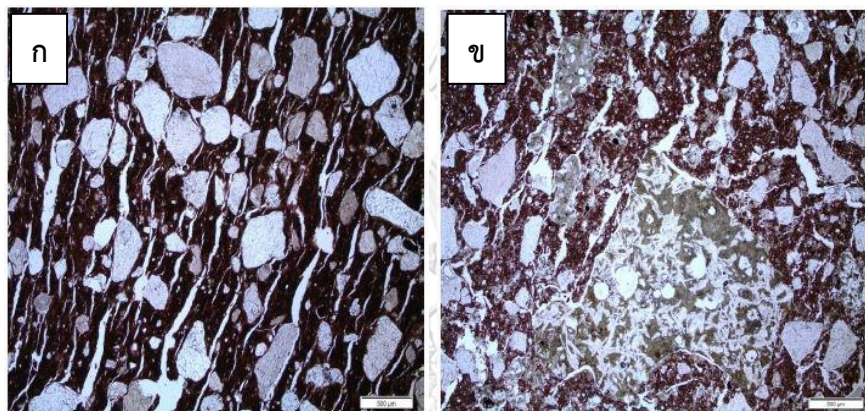
รูปที่ 2.16 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานจากการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ก) ดิน100% และ ข) ดิน50% ผสมเถ้าลอย 50% [34]



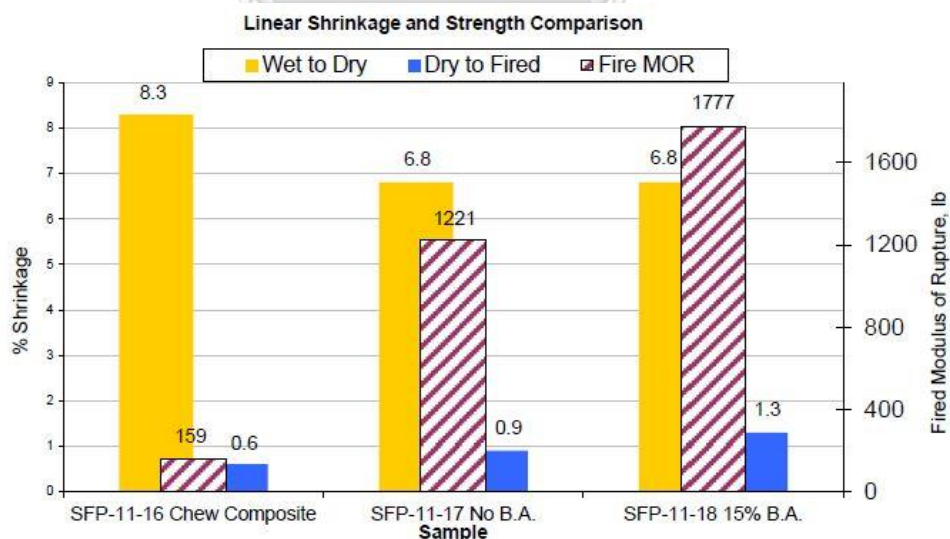
รูปที่ 2.17 ผลการวิเคราะห์สมบัติของชิ้นงานที่ผสมเถ้าลอยอัตราส่วนต่างๆ ก) การดูดซึมน้ำ และ ข) ความแข็งแรงต่อการกด [34]

G. V Taylor และ W. Daidone [35] ใช้เถ้าหนักเป็นส่วนผสมร่วมกับดินเหนียวและทราย ชิ้นรูปชิ้นงานเทียบกับชิ้นงานอิฐอ้างอิงซึ่งใช้ดินเหนียวผสมกับทราย วัตถุประสงค์หลักคือต้องการใช้เถ้าหนักทดแทนในทรายบางส่วน เนื่องจากชิ้นงานอิฐดินเหนียวผสมทรายจะมีการหดตัวเมื่อแห้งและ

หัตถ์หลังเผาสูงทำให้อิฐมีโอกาสดกได้ โดยสูตรที่ผสมเถ้าหนักจะใช้เถ้าหนัก 15 wt% ดินเหนียว 53 wt% และทราย 32 wt% ในขณะที่ชิ้นงานอิฐอ้างอิงใช้ดินเหนียว 60 wt% และทราย 40 wt% นำวัตถุดิบบดและร่อนผ่านตะแกรง 8 เมช จากนั้นอัดขึ้นรูปเป็นชิ้นงานอิฐ พบว่าเถ้าหนักจะช่วยเพิ่มความแข็งแรงต่อการโค้งงอ ช่วยลดอัตราการปล่อยความชื้นของชิ้นงานจากกระบวนการกำจัดน้ำออกจากชิ้นงาน เกิดจากวัตถุดิบผสมตัวกันเป็นเนื้อเดียว **รูปที่ 2.18** ชิ้นงานที่ไม่เติมเถ้าหนักจะมีพื้นที่ว่างซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนโครงสร้างของควอตซ์มากเกินไป นอกจากนี้ยังพบว่าชิ้นงานที่ผสมเถ้าหนักมีปริมาณพลาจีโอเคลสเฟลด์สปาร์สูงขึ้นจาก 5% เป็น 35% หลังจากการเผา ทำให้ตีความได้ว่าเถ้าหนักช่วยลดจุดสุกตัวของชิ้นงาน ทำให้สมบัติด้านความแข็งแรงหลังเผาสูงขึ้น **รูปที่ 2.19**

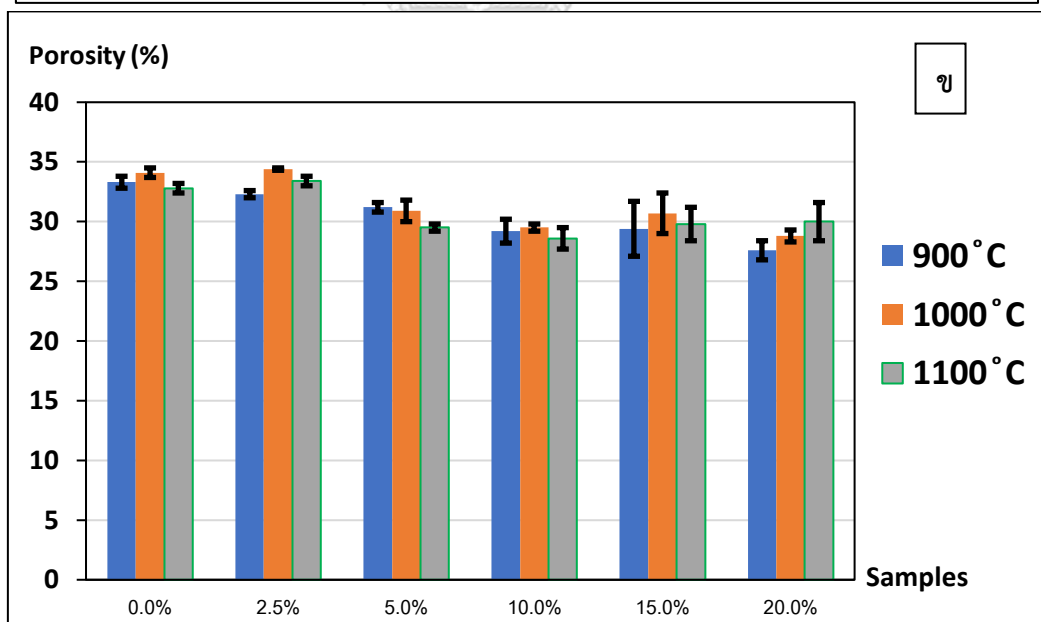
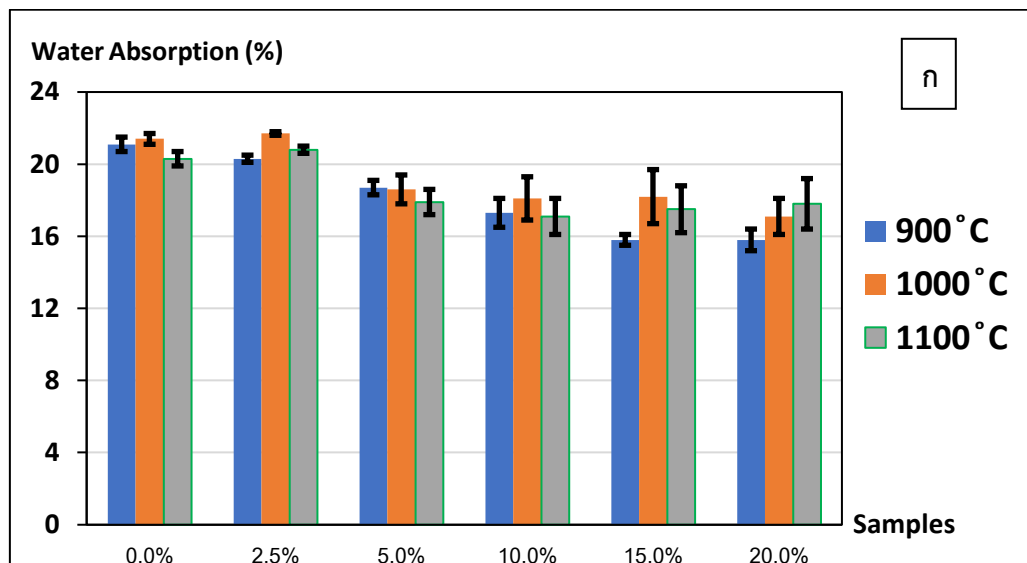


รูปที่ 2.18 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานจากการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ก) แบบไม่เติมเถ้าหนัก และ ข) แบบเติมเถ้าหนัก [35]



รูปที่ 2.19 ผลวิเคราะห์การหดตัวและความแข็งแรงต่อการโค้งงอของชิ้นงานของ ดินปกติ(ซ้าย) ดินผสมทราย(กลาง) และดินผสมทรายและเถ้าหนัก (ขวา) [35]

B. Sena da Fonseca และคณะ [36] ได้ผสมเถ้าหนัก 0-20 wt% เข้ากับดินเหนียวอัดขึ้นรูปเป็นอิฐสำหรับใช้ในงานก่อสร้างด้วยวิธีการอัดและเผาที่อุณหภูมิ 900-1100°C พบว่าเมื่อปริมาณเถ้าหนักเพิ่มขึ้น ค่าการดูดซึมน้ำและค่าความมีรูพรุนของชิ้นงานมีค่าใกล้เคียงกันเนื่องจากมีปัจจัยอื่น เช่น โครงสร้างของรูพรุน ประเภทของสารละลายที่ใช้ในการทดสอบ การเผาที่อุณหภูมิ 1100°C ชิ้นงานมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น เนื่องจากโครงสร้างภายในเริ่มมีการเกิดเป็นแก้ว (Vitrification)



รูปที่ 2.20 ผลการทดสอบสมบัติต่างๆของชิ้นงานที่ผสมเถ้าหนักอัตราส่วนต่างกัน ก) การดูดซึมน้ำ และ ข) การมีรูพรุน [36]

กล่าวโดยสรุปงานวิจัยนี้จะทดลองนำเถ้าลอยและเถ้าหนักมาใช้ทดแทนตัวผสม เช่น ทราย และหินผุ ศึกษาโครงสร้างผลึกด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer) และองค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่องวัดการเรืองแสงของรังสีเอกซ์ (X-ray fluorescence) กำหนดการเติมของเถ้าลอยและเถ้าหนักไว้ที่ 0-40 wt% ขึ้นอยู่กับชนิดของผลิตภัณฑ์ หลังจากผสมเสร็จบ่มทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง ขึ้นรูปชิ้นงาน อบแห้ง 24 ชั่วโมงและเผาที่อุณหภูมิ 800-1200 °C ขึ้นอยู่กับชนิดของผลิตภัณฑ์ วิเคราะห์การหดตัวของชิ้นงานหลังอบแห้ง (Drying shrinkage) การหดตัวหลังเผา (Firing shrinkage) แนวโน้มของสี (Color test : CIELab) การดูดซึมน้ำ (Water absorption) และความแข็งแรงต่อการแตกหัก (3-point bending strength) สุดท้ายชิ้นงานจะถูกทุบและนำไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope) และบดเป็นผงเพื่อศึกษาโครงสร้างผลึกที่เปลี่ยนไป วิเคราะห์ผลเทียบกับชิ้นงานที่ใช้ส่วนผสมเดียวกับโรงงานอุตสาหกรรม เพื่อเป็นการสรุปว่ามีความเป็นไปได้หรือไม่ที่จะนำเถ้าลอยและเถ้าหนักไปใช้ในอุตสาหกรรมเซรามิก เครื่องปั้นดินเผา และมีสมบัติแตกต่างกันอย่างไร

บทที่ 3

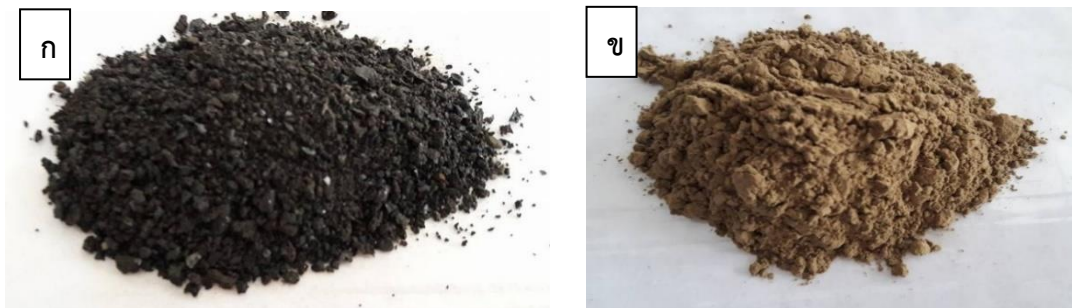
วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมีและวัตถุดิบที่ใช้ในงานวิจัย

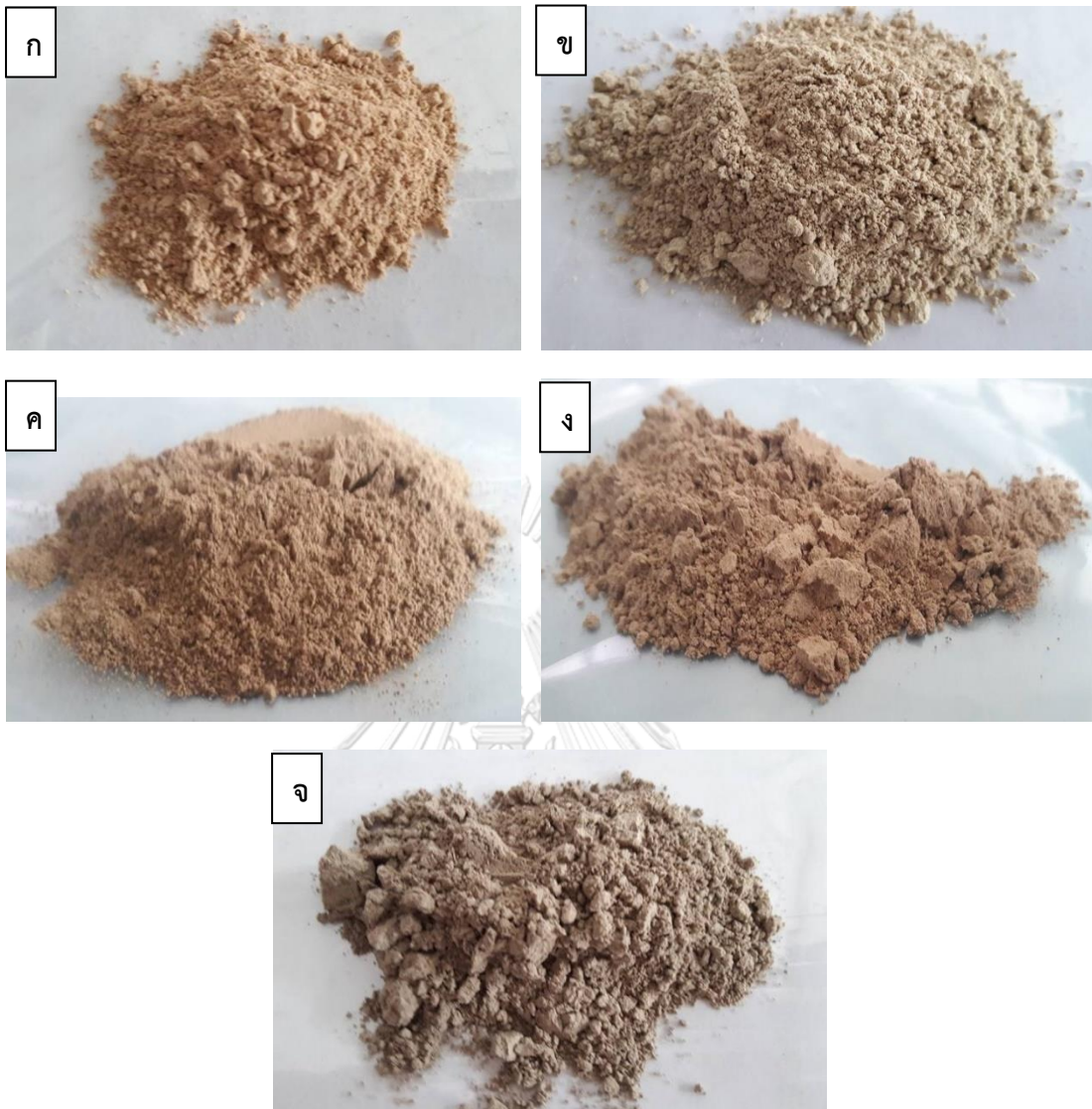
- 1) แล้วยและแล้หนักบิพูนินัส จากบริษัท โกลว์ กรุ๊ป จำกัด
- 2) ดินเหนียวจากจังหวัดราชบุรี จากโรงงานโอ่งอุดมดินไทย
- 3) ดินเหนียวจากจังหวัดจันทบุรี จากโรงงานตั้งเจริญเครื่องปั้นดินเผา
- 4) ดินเหนียวจากจังหวัดอ่างทอง จากบริษัท อ. ป. ก. ดาวคู่ จำกัด
- 5) ดินเหนียวจากจังหวัดชลบุรี จากโรงงานอิฐประเสริฐชัย
- 6) ดินดำจากจังหวัดปราจีนบุรี จากบริษัท บีเซน จำกัด
- 7) ทราเยมน้ำ จากโรงงานโอ่งอุดมดินไทยขนาด 16 เมช
- 8) หินผุ จากบริษัท ชิเบลไค้มินเนอรัล (ประเทศไทย) จำกัด ขนาด 325 เมช

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

- 1) ตะแกรงขนาด 60 เมช
- 2) ตู้อบ
- 3) เครื่องบด Rotary mill รุ่น RC-30
- 4) เครื่องอัด Hydraulic press ยี่ห้อ Npa รุ่น NT-100H
- 5) เครื่อง Extruder
- 6) เครื่องอัดกระเบื้อง Hydraulic press ยี่ห้อGabbrielli รุ่น Pressa 40T
- 7) เวอร์เนียบคาลิปเปอร์แบบดิจิตอล
- 8) เตาเผา Gradient รุ่น GR 1330/13
- 9) เตาเผา ยี่ห้อ Inter kilns
- 10) เครื่อง Chroma meter ยี่ห้อ Konica Minolta รุ่น CR-400



รูปที่ 3.1 ลักษณะภายนอกของแล้ถ่านหินบิพูนินัส ก) แล้หนัก และ ข) แล้ลอย



รูปที่ 3.2 ลักษณะภายนอกของดิน 5 ชนิด ก) ดินเหนียวราชบุรี ข) ดินเหนียวจันทบุรี ค) ดินเหนียวอ่างทอง ง) ดินเหนียวชลบุรี และ จ) ดินดำปราจีนบุรี



รูปที่ 3.3 ลักษณะภายนอกของวัตถุดิบตัวเต็ม ก) ทรายแม่น้ำ และ ข) หินผุ

3.3 ขั้นตอนการเตรียมวัสดุดิบและก้อนดินผสม

3.3.1 การเตรียมวัสดุดิบ

นำวัสดุดิบ ได้แก่ ดินจังหวัดตราซบุรี จันทบุรี อ่างทอง ชลบุรี และปราจีนบุรี เถ้าลอย เถ้าหนัก ไปอบที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นบดด้วยเครื่อง Rotary mill รุ่น RC-30 ร่อนผ่านตะแกรง 60 เมช



รูปที่ 3.4 เครื่องบด Rotary mill รุ่น RC-30

3.3.2 การเตรียมก้อนดินผสม

นำดินทั้ง 5 ชนิด เถ้าลอย เถ้าหนัก หินผุ และทรายแม่น้ำผสมกับน้ำบริสุทธิ์ (RO, reverse osmosis water) ในชามผสม โดยใช้อัตราส่วนตาม ตารางที่ 3.1 - ตารางที่ 3.3

กวนด้วยไม้พาย นวดให้เข้ากันเป็นเนื้อเดียว นำไปบ่มไว้ 24 ชม.เพื่อเตรียมขึ้นรูป



รูปที่ 3.5 การเตรียมก้อนดินผสม

การกำหนดสูตรส่วนผสมจะอ้างอิงจากสูตรมาตรฐานที่ใช้ในแต่ละกลุ่มอุตสาหกรรมเป็นหลัก โดยจะมี 1 สูตรที่เป็นสูตรอ้างอิงเพื่อใช้อ้างอิงสมบัติของชิ้นงานที่ผสมเถ้าเทียบกับชิ้นงานดังกล่าว

สำหรับดินเหนียวราชบุรีและจันทบุรีจะมีสูตรอ้างอิงคือผสมทรายแม่น้ำ 10 wt% ดังนั้นจะกำหนดให้ปริมาณของทรายเพิ่มขึ้น-ลดลงเล็กน้อยเพื่อตรวจสอบสมบัติหาคัดส่วนแก้ว ไม่ได้เท่ากับ 10% พอดีในทุกรอบ ว่าสมบัติจะเปลี่ยนแปลงหรือไม่อย่างไร สัดส่วนเถ้าหนักและเถ้าลอยจะอยู่ที่ 10-20 wt% .ให้สอดคล้องกับสูตรอ้างอิง และเนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่จะนำไปใช้งานต่อมีการขึ้นรูปด้วยแป้นหมุนหรือ Throwing เนื้อผลิตภัณฑ์จึงต้องมีความเหนียวพอสมควร จึงกำหนดให้สัดส่วนของเถ้าไม่สูงมากเกินไปดังใน **ตารางที่ 3.1**

ตารางที่ 3.1 สูตรส่วนผสมสำหรับดินเหนียวราชบุรี (R) และดินเหนียวจันทบุรี (J) น้ำหนักรวม 2,000 กรัม ผสมน้ำ 22 wt% (สูตรอ้างอิงคือ R3 และ J3)

ส่วนผสม/ ชื่อสูตร (wt%)	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8
	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8
ดินเหนียวราชบุรี/ จันทบุรี	100	95	90	80	90	80	90	80
ทรายแม่น้ำ	0	5	10	20	-	-	-	-
เถ้าหนัก	-	-	-	-	10	20	-	-
เถ้าลอย	-	-	-	-	-	-	10	20
รวม	100	100	100	100	100	100	100	100

สำหรับดินเหนียวอ่างทองและชลบุรีจะมีสูตรอ้างอิงคือผสมทรายแม่น้ำ 10 wt% กำหนดให้ผสมทรายในช่วง 10-20 wt% อย่างไรก็ตาม ผลิตภัณฑ์ที่จะนำไปใช้งานคืออิฐ ซึ่งใช้การอัดรีดในการขึ้นรูป ดังนั้นความเหนียวของชิ้นงานจึงไม่ต้องเหนียวมากเท่ากับโอ่งราชบุรี สัดส่วนของเถ้าที่ผสมจึงเพิ่มขึ้นเป็น 30 และ 40 wt% ดังใน **ตารางที่ 3.2**

ตารางที่ 3.2 สูตรส่วนผสมสำหรับดินเหนียวชลบุรี (C) และดินเหนียวอ่างทอง (A) น้ำหนักรวม 2,000 กรัม ผสมน้ำ 22 wt% (สูตรอ้างอิงคือ C2 และ A2)

ส่วนผสม/ ชื่อสูตร (wt%)	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11
	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11
ดินเหนียวชลบุรี/ อ่างทอง	100	90	80	90	80	70	60	90	80	70	60
ทรายแม่น้ำ	0	10	20	-	-	-	-	-	-	-	-
เถ้าหนัก	-	-	-	10	20	30	40	-	-	-	-
เถ้าลอย	-	-	-	-	-	-	-	10	20	30	40
รวม	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

สำหรับดินดำปราจีนบุรีจะมีสูตรอ้างอิงคือผสมหินผุ 50 wt% กำหนดให้ผสมหินผุ 50-60 wt% และผสมเถ้าหนักหรือเถ้าลอย 40-60 wt% ตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ส่วนผสมสำหรับดินดำปราจีนบุรี (P) น้ำหนักรวม 2,000 กรัม ผสมน้ำ 7 wt% (สูตรอ้างอิงคือ P1)

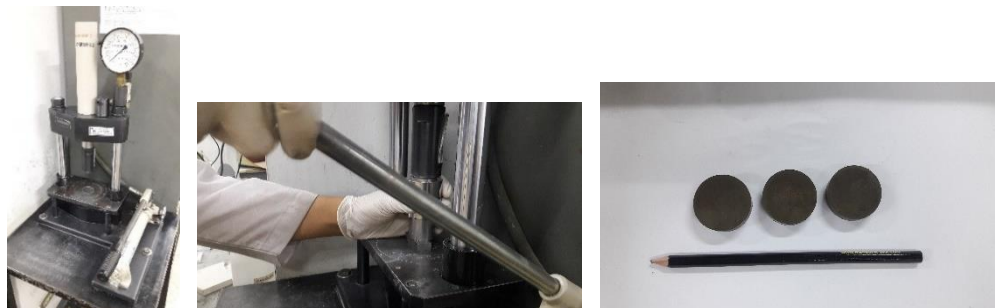
ส่วนผสม/ ชื่อสูตร (wt%)	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
ดินดำปราจีนบุรี	50	60	40	50	60	40	50	60
หินผุ	50	40	-	-	-	-	-	-
เถ้าหนัก	-	-	60	50	40	-	-	-
เถ้าลอย	-	-	-	-	-	60	50	40
รวม	100	100	100	100	100	100	100	100

3.4 ขั้นตอนการขึ้นรูปชิ้นงาน และการเผาชิ้นงาน

3.4.1 ขึ้นรูปเม็ดกลม (Pellet)

หลังจากผ่านการบ่มทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง ก้อนดินทุกสูตรจะขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดด้วยไฮดรอลิก (Hydraulic Press) ในงานวิจัยนี้จะใช้เครื่องอัดยี่ห้อ Npa รุ่น NT-100H ทุกสูตรได้แก่ R1-R8, J1-J8, C1-C11, A1-A11 และ P1-P8 อัดขึ้นเป็นเม็ดกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 มิลลิเมตร หนา 8 มิลลิเมตร สูตรละ 20 เม็ด โดยสูตร R1-R8, J1-J8, C1-C11 และ A1-A11 จะอัดที่ความดัน 1 เมกะ

พาสคัล สูตร P1-P8 อัดที่ความดัน 20 MPa จากนั้นนำชิ้นงานไปอบที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง



รูปที่ 3.6 การอัดขึ้นรูปชิ้นงานเม็ดกลม

3.4.2 ขึ้นรูปชิ้นงานแท่งกลม (Cylinder)

นำก้อนดินสูตร R1-R8, J1-J8, C1-C11 และ A1-A11 มาขึ้นรูปแบบแท่งด้วยวิธีอัดรีด โดยใช้เครื่อง Extruder ให้แต่ละแท่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ยาว 100 มิลลิเมตร สูตรละ 15 แท่ง จากนั้นนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง



รูปที่ 3.7 การขึ้นรูปชิ้นงานด้วยวิธีการอัดรีด

3.4.3 ขึ้นรูปชิ้นงานกระเบื้อง (Tile)

นำก้อนดินผสมสูตร P1-P8 สูตรละ 15 ชิ้น ขึ้นรูปเป็นกระเบื้องขนาด 50 x 100 มิลลิเมตร ด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิกยี่ห้อ Gabrielli รุ่น Pressa 40T ด้วยความดัน 20 เมกะพาสคัล จากนั้นอบที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง



รูปที่ 3.8 การขึ้นรูปชิ้นงานกระเบื้อง

3.4.4 การเผาชิ้นงาน

ชิ้นงานที่ผ่านการอบเป็นเวลา 24 ชั่วโมงจะถูกนำไปเผาด้วยเตา Gradient รุ่น GR 1330/13 ผลิตโดยบริษัท Nabertherm® Lilienthal (Germany) และเตาเผาอี้อ Inter kilns โดยเผาที่อุณหภูมิต่างกัน ดังนี้

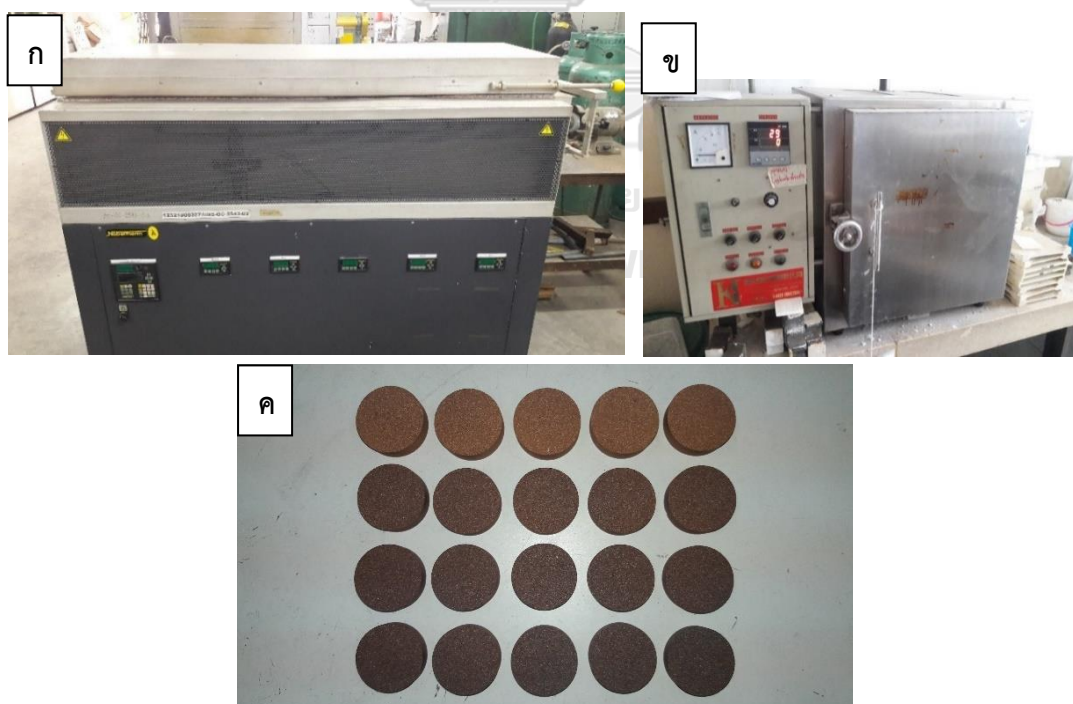
- ชิ้นงานเม็ดกลมสูตร R1-R8, J1-J8 และ P1-P8 เผาด้วยเตา Gradient ที่อุณหภูมิ 1100, 1150, 1175 และ 1200 °C อุณหภูมิละ 5 °C อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ 5 °C/min ระยะเวลาเย็นไฟ 30 นาที

- ชิ้นงานเม็ดกลมสูตร C1-C11 และ A1-A11 เผาด้วยเตา Gradient ที่อุณหภูมิ 800, 900 และ 1000 °C อุณหภูมิละ 5 °C อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ 5 °C/min ระยะเวลาเย็นไฟ 30 นาที

- ชิ้นงานแท่งกลมสูตร R1-R8 และ J1-J8 เผาด้วยเตา Inter kilns ที่อุณหภูมิ 1175 และ 1200 °C อุณหภูมิละ 5 °C อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ 5 °C/min ระยะเวลาเย็นไฟ 30 นาที

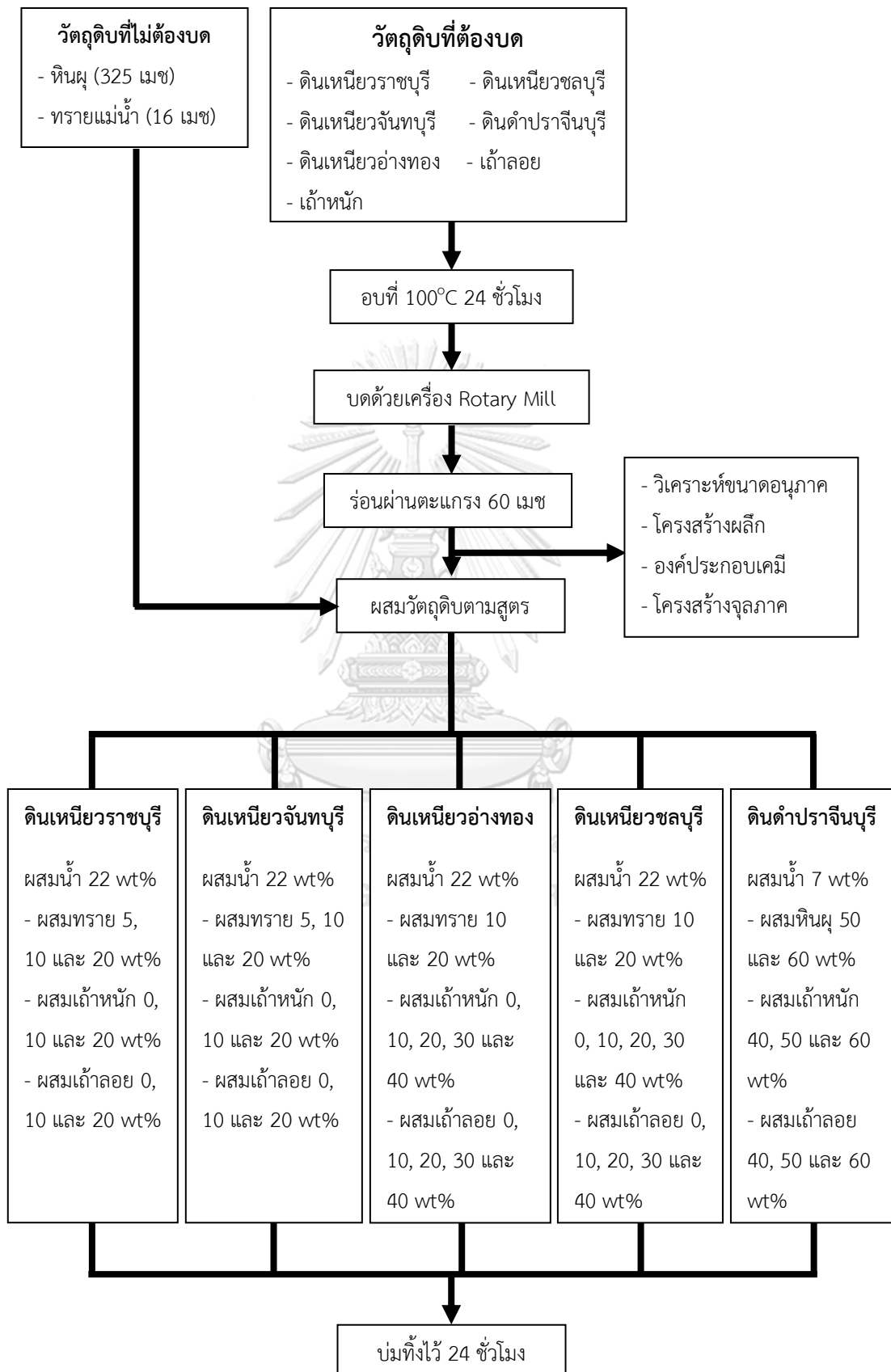
- ชิ้นงานแท่งกลมสูตร C1-C11 และ A1-A11 เผาด้วยเตา Inter kilns ที่อุณหภูมิ 800 และ 900 °C อุณหภูมิละ 5 °C อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ 5 °C/min ระยะเวลาเย็นไฟ 30 นาที

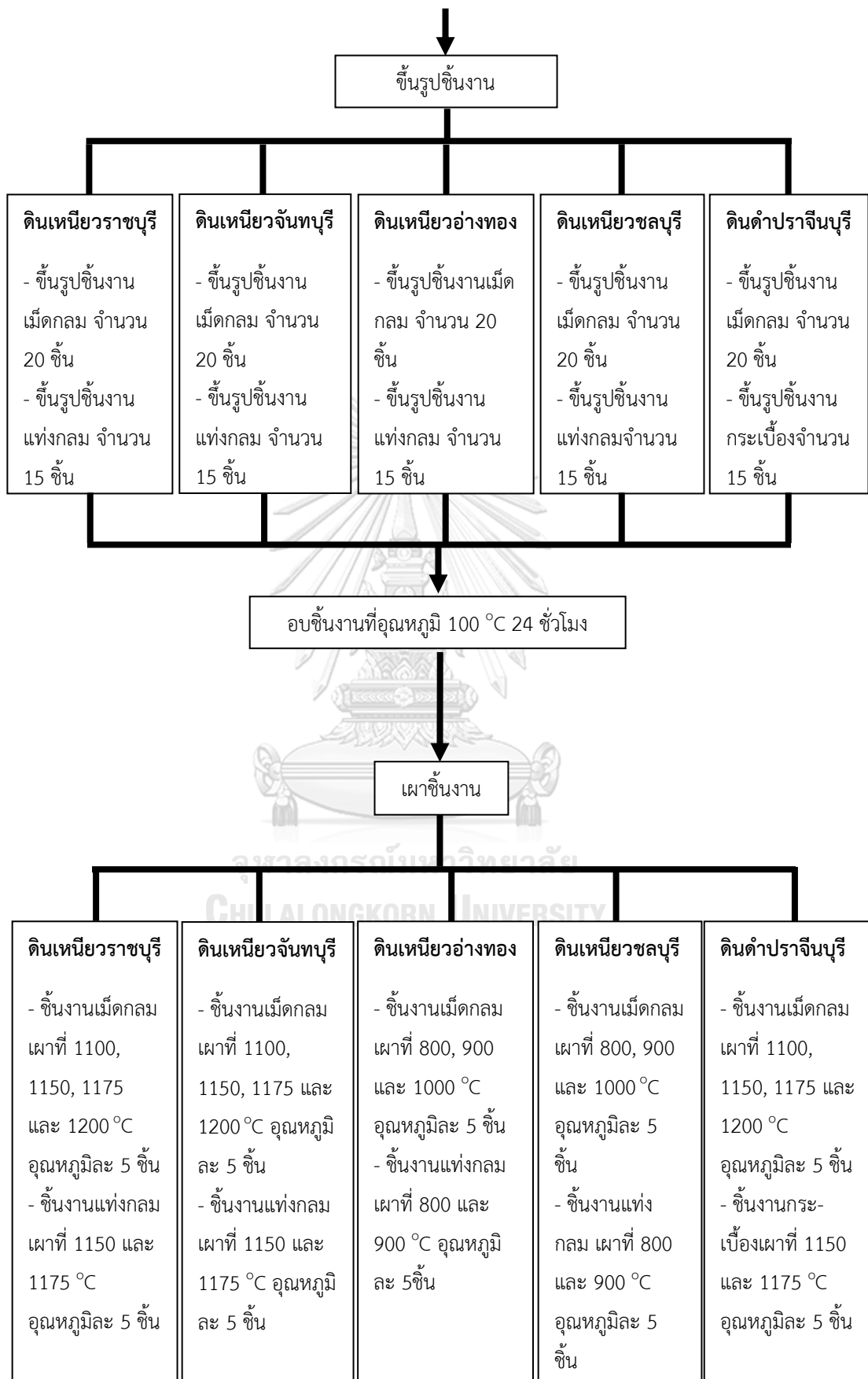
- ชิ้นงานกระเบื้อง P1-P8 เผาด้วยเตา Inter kilns ที่อุณหภูมิ 1150 และ 1175 °C อุณหภูมิละ 5 °C อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ 5 °C/min ระยะเวลาเย็นไฟ 30 นาที

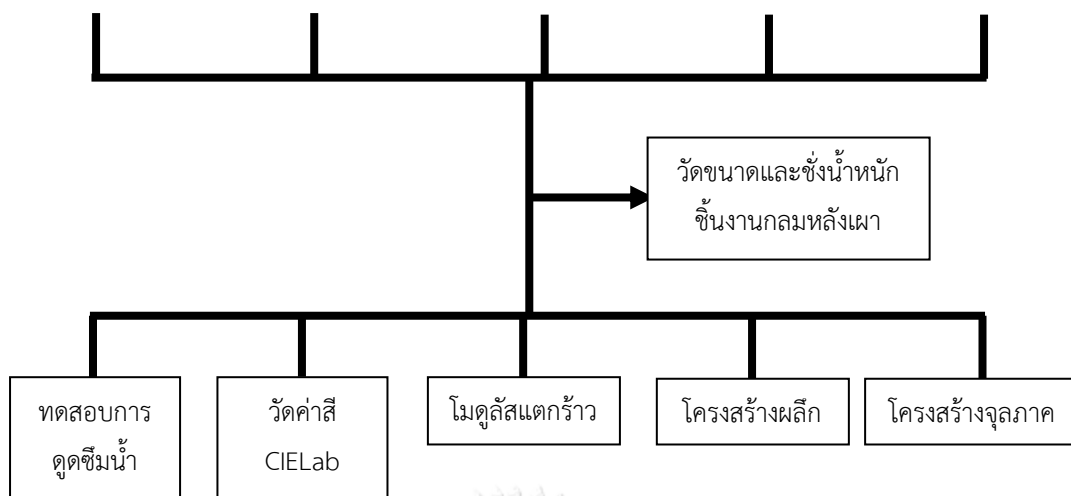


รูปที่ 3.9 เตาเผาที่ใช้ในงานวิจัย ก) เตาเผา Gradient ข) เตาเผา Inter kilns และ ค) ตัวอย่างชิ้นงานหลังเผา

3.5 แผนผังการทดลอง







รูปที่ 3.10 แผนผังการทำงานวิจัย

3.6 การวิเคราะห์สมบัติและลักษณะของวัสดุดิบและชิ้นงาน

วัสดุดิบที่ผ่านการบดและร่อนผ่าน 60 เมช จะถูกนำไปวิเคราะห์ขนาดอนุภาค โครงผลึก องค์ประกอบทางเคมี และโครงสร้างจุลภาค ชิ้นงานเม็ดกลมที่ผ่านการอบแห้งแล้วจะถูกวัดขนาดและชั่งน้ำหนักก่อนเผา (Drying Shrinkage) หลังจากเผาแล้วจะถูกวัดขนาดและชั่งน้ำหนักหลังเผาอีกครั้ง เพื่อนำไปคำนวณหาการหดตัวของชิ้นงานหลังเผา (Firing Shrinkage) จากนั้นจะถูกวิเคราะห์การดูดซึมน้ำ (Water Absorption) วัดค่าสี (CIELab) ศึกษาโครงสร้างผลึก (Crystal structure) และโครงสร้างจุลภาค (Morphology) ส่วนชิ้นงานแท่งกลมและกระเบื้องจะนำไปวิเคราะห์โมดูลัสแตกร้าว (Modulus of Rupture)

3.6.1 การวิเคราะห์ขนาดอนุภาคด้วยเทคนิคการวัดการกระจายอนุภาค (Particle Size Analyzer)

ในงานวิจัยนี้จะใช้เครื่องยี่ห้อ Malvern รุ่น Mastersizer 2000 วิเคราะห์ขนาดของวัสดุดิบที่ไม่ต้องบด ได้แก่ หินผุ และทรายแม่น้ำ กับวัสดุดิบที่ผ่านการบดและร่อนผ่าน 60 เมชแล้ว ได้แก่ ใก้าลอย ใก้าหนักบิพุมินัส ดินเหนียวราชบุรี จันทบุรี อ่างทอง ชลบุรี และดินดำปราจีนบุรี นำวัสดุดิบทั้งหมดที่กล่าวมากระจายตัวในน้ำ RO จากนั้นจึงนำเข้าเครื่องวิเคราะห์

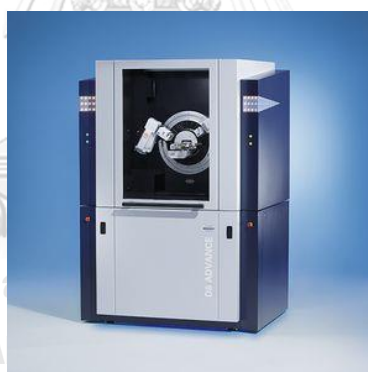


รูปที่ 3.11 เครื่อง Particle Size Analyzer ยี่ห้อ Malvern รุ่น Mastersizer 2000

3.6.2 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer : XRD)

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้เครื่อง XRD รุ่น D8 Advance วิเคราะห์โครงสร้างผลึกของวัสดุกับผงชิ้นงานซึ่งผ่านกระบวนการผสมและเผาแล้วเพื่อศึกษาโครงสร้างผลึกที่อาจเปลี่ยนแปลงไป โดยจะวิเคราะห์วัสดุที่ไม่ต้องบด ได้แก่ หินผุ และทรายแม่น้ำ กับวัสดุที่ผ่านการบดและร่อนผ่าน 60 เมชแล้ว ได้แก่ แก้วลอย แก้วหนักบิพุมินัส ดินเหนียวราชบุรี จันทบุรี อ่างทอง ชลบุรี และดินดำปราจีนบุรี ผงชิ้นงานจะได้จากทุบแล้วบดชิ้นงานที่ผสมและเผาแล้ว ในการเลือกสูตรชิ้นงานจะดูจากสมบัติด้านอื่นๆ เช่น ความแข็งแรง การดูดซึมน้ำ และอุณหภูมิที่ใช้เผา โดยในที่นี้จะได้แก่ ชิ้นงานดินเหนียวราชบุรี ผสมแก้วหนักหรือแก้วลอย 20 wt% เผาที่อุณหภูมิ 1175 °C ดินเหนียวจันทบุรีผสมแก้วหนักหรือแก้วลอย 20 wt% เผาที่อุณหภูมิ 1200 °C ดินเหนียวอ่างทองผสมแก้วหนักหรือแก้วลอย 20 wt% เผาที่อุณหภูมิ 900 °C ดินเหนียวชลบุรีผสมแก้วหนักหรือแก้วลอย 20 wt% เผาที่อุณหภูมิ 900 °C และดินดำปราจีนบุรีผสมแก้วหนักหรือแก้วลอย 60 wt%

นำผงวัสดุและผงชิ้นงานอบที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นจึงนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟส



รูปที่ 3.12 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advance [37]

3.6.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่องวิเคราะห์การเรืองแสงด้วยรังสีเอกซ์ (X-ray fluorescence : XRF)

ในงานวิจัยนี้จะใช้เครื่อง XRF โหมด Wavelength Dispersion (WDXRF) ยี่ห้อ Bruker รุ่น S8 Tiger โดยนำวัสดุทั้งหมดได้แก่ แก้วลอย แก้วหนักบิพุมินัส หินผุ ทรายแม่น้ำ ดินเหนียวราชบุรี จันทบุรี อ่างทอง ชลบุรี และดินดำปราจีนบุรี มาอบแห้งที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นจึงนำไปวิเคราะห์



รูปที่ 3.13 เครื่องวิเคราะห์การเรืองแสงด้วยรังสีเอกซ์ [38]

3.6.4 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM)

ในงานวิจัยนี้จะใช้เครื่อง SEM ยี่ห้อ Jeol รุ่น JSM-6480LV วิเคราะห์วัตถุที่ไม่ต้องบด ได้แก่ หินผุ และทรายแม่น้ำ กับวัตถุที่ผ่านการบดและร่อนผ่าน 60 เมชแล้ว ได้แก่ ใ้ถาลอย ใ้ถาหนักบิทูมินัส ดินเหนียวราชบุรี จันทบุรี อ่างทอง ชลบุรี และดินดำปราจีนบุรี ชิ้นงานดินเหนียวราชบุรี ผสมทรายแม่น้ำ 10 wt%, ผสมใ้ถาหนัก 20 wt% หรือใ้ถาลอย 20 wt% เผาที่อุณหภูมิ 1175 °C ดินเหนียวจันทบุรีผสมทรายแม่น้ำ 10 wt%, ผสมใ้ถาหนักหรือใ้ถาลอย 20 wt% เผาที่อุณหภูมิ 1200 °C ดินเหนียวอ่างทองผสมทรายแม่น้ำ 10 wt%, ใ้ถาหนักหรือใ้ถาลอย 20 wt% เผาที่อุณหภูมิ 900 °C ดินเหนียวชลบุรีผสมทรายแม่น้ำ 10 wt%, ใ้ถาหนักหรือใ้ถาลอย 20 wt% เผาที่อุณหภูมิ 900 °C และดินดำปราจีนบุรีผสมหินผุ 50 wt%, ใ้ถาหนักหรือใ้ถาลอย 60 wt%

นำชิ้นงานมาทุบให้มีขนาดเล็ก จากนั้นนำชิ้นงานและวัตถุทั้งหมดอบที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นจึงนำไปวิเคราะห์



รูปที่ 3.14 เครื่อง SEM ยี่ห้อ Jeol รุ่น JSM-6480LV

3.6.5 การหดตัวของชิ้นงานเมื่อแห้ง (Drying Shrinkage)

ในขณะที่ขึ้นรูปชิ้นงานจากก้อนดินผสมชิ้นงานจะยังคงมีความชื้น มีน้ำแทรกอยู่ในเนื้อผลิตภัณฑ์ แต่เมื่อทำการอบแห้งความชื้นและน้ำในชิ้นงานจะระเหยออกไป เมื่อน้ำออกจากชิ้นงาน โครงสร้างภายในจะเกิดการหดตัวเข้าหาจุดศูนย์กลางของชิ้นงาน ค่าการหดตัวของชิ้นงานหลังผ่านการอบแห้งจะคำนวณจากการวัดขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานเมื่อกลมด้วยเวอร์เนียคาลิเปอร์ หลังจากการอัดขึ้นรูปก่อนอบแห้งซึ่งยังมีความชื้นอยู่มาเทียบกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหลังนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง สามารถคำนวณออกมาได้จากสมการ

$$\text{การหดตัวของชิ้นงานหลังอบแห้ง (\%)} = \frac{D_p - D_d}{D_p} \times 100 \quad (3.1)$$

โดยที่ D_p คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานก่อนอบแห้ง (มิลลิเมตร)

D_d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานหลังอบแห้ง (มิลลิเมตร)

3.6.6 การหดตัวของชิ้นงานหลังเผา (Firing Shrinkage)

การเผาชิ้นงานจะเป็นการให้ความร้อนกับชิ้นงาน เป็นการทำให้ชิ้นงานเกาะตัวกันเป็นโครงสร้างที่แข็งแรงมากขึ้น สารอินทรีย์จะถูกความร้อนกำจัดออกจากชิ้นงานซึ่งทำให้ชิ้นงานเกิดการหดตัวอีกครั้งหนึ่ง ค่าการหดตัวของชิ้นงานหลังเผาจะคำนวณจากการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหลังจากการอบแห้งมาเทียบกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหลังผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่างๆ ตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้ในขั้นตอนการทำการทดลอง คำนวณได้จากสมการ

$$\text{การหดตัวของชิ้นงานหลังเผา (\%)} = \frac{D_d - D_f}{D_d} \times 100 \quad (3.2)$$

โดยที่ D_d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานหลังอบแห้ง (มิลลิเมตร)

D_f คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานหลังเผา (มิลลิเมตร)

3.6.7 ค่าการดูดซึมน้ำ (Water Absorption)

นำชิ้นงานเมื่อกลมที่ผ่านการเผาแล้วทุกสูตรอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมงจนแห้ง ใช้น้ำบริสุทธิ์ (RO water) ในการทดสอบ

ชิ้นงานผลิตภัณฑ์โถ่งดินเหนียวราชบุรีและจันทบุรีจะทดสอบตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน (มผช.) ๔๖/๒๕๕๖ นำชิ้นงานวางในหม้อ ต้มน้ำให้เดือดเป็นเวลา 5 ชั่วโมง เติมน้ำให้ท่วมชิ้นงานตลอดเวลา จากนั้นทิ้งให้ชิ้นงานเย็นตัวในน้ำดังกล่าวจนมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง 24 ชั่วโมง เมื่อ

ครบเวลาให้เช็ดด้วยผ้าหมาดแล้วชั่งบนตาชั่งทันที คำนวณตามสมการที่ 3.3 ค่าเฉลี่ยการดูดซึมน้ำต้องมีค่าไม่เกิน 8 wt%

$$\text{การดูดซึมน้ำ (\%)} = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100 \quad (3.3)$$

เมื่อ m_2 คือ มวลของชิ้นงานทดสอบหลังจากแช่น้ำ (กรัม)

m_1 คือ มวลของชิ้นงานทดสอบที่อบแห้ง (กรัม)

ชิ้นงานอิฐดินเผาก่อสร้างดินเหนียวอ่างทองและชลบุรีจะทดสอบตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมอิฐก่อสร้างสามัญ (มอก.) ๗๗-๒๕๔๕ นำชิ้นงานที่ผ่านการอบแห้งแล้วมาแช่น้ำเป็นเวลา 5 ชั่วโมง จากนั้นเช็ดด้วยผ้าหมาดแล้วชั่งน้ำหนัก ค่าการดูดซึมน้ำสำหรับชั้นคุณภาพ ก จะอยู่ระหว่าง 17-20 % ชั้น ข อยู่ระหว่าง 22-25 % และชั้น ค จะไม่มีการกำหนดมาตรฐานการดูดซึมน้ำ

ดินดำปราจีนบุรีจะแช่น้ำเดือด 100 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และปล่อยให้แช่ที่อุณหภูมิห้อง 4 ชั่วโมง โดยใช้ผ้าขาวม้าเช็ดหมาด จากนั้นจึงชั่งน้ำหนัก คำนวณค่าการดูดซึมน้ำโดยเปรียบเทียบจากน้ำหนักก่อนแช่น้ำและน้ำหนักหลังแช่น้ำได้จากสมการที่ 3.3 ตามมอก. 2508-2555 กระเบื้องที่อัดแห้งที่จัดว่ามีค่าการดูดซึมน้ำต่ำ (BI₀) จะต้องมีค่าการดูดซึมน้ำเฉลี่ยต่ำกว่า 0.5 % แต่แผ่นไม่สูงเกิน 0.6 กระเบื้องดูดซึมน้ำปานกลาง (BII₀) ค่าการดูดซึมน้ำเฉลี่ยจะมากกว่า 3 % แต่ไม่เกิน 6 % และแต่ละแผ่นค่าไม่เกิน 6.5 % กระเบื้องดูดซึมน้ำมาก (BIII) จะมีค่าการดูดซึมน้ำเฉลี่ยมากกว่า 10 % แต่ไม่เกิน 20 %



รูปที่.3.15 การแช่ชิ้นงานเพื่อวัดการดูดซึมน้ำ

3.6.8 การวัดค่าสีด้วยเทคนิค CIELab

วิเคราะห์ค่าเม็ดสีของชิ้นงานเม็ดกลมที่ผ่านการเผาแล้วทุกสูตร โดยใช้เครื่อง Chroma meter ยี่ห้อ Konica Minolta รุ่น CR-400 วิเคราะห์แล้วพล็อตกราฟเพื่อเปรียบเทียบสีของชิ้นงานว่ามีลักษณะแดงสดขึ้นจริงหรือไม่ มากน้อยเพียงใด



รูปที่ 3.16 เครื่อง Chroma meter ยี่ห้อ Konica Minolta รุ่น CR-400

3.6.9 การทดสอบโมดูลัสแตกร้าวด้วยเทคนิควิเคราะห์ความแข็งแรงแบบ 3 จุด (3-point bending strength)

ทดสอบความแข็งของชิ้นงานดินผสมแต่ละสูตรหลังเผา ด้วยการนำชิ้นงานแท่งกลมและกระเบื้องที่ผ่านการเผาแล้วทุกสูตรมาทดสอบด้วยเครื่อง Tensile / Compression Strength Tester ยี่ห้อ Hung Ta รุ่น HT-8116 นำค่าที่ได้มาคำนวณเพื่อหาโมดูลัสแตกร้าวด (Modulus of Rupture : MOR) ด้วยสมการ 3.4 สำหรับชิ้นงานกระเบื้อง และ สมการ 3.5 สำหรับชิ้นงานแท่งกลม

สำหรับชิ้นงานแท่งหน้าตัดสี่เหลี่ยม

$$\text{โมดูลัสแตกร้าวด} = \frac{3PL}{2bd^2} \times 0.098 \text{ (เมกะพาสคัล)} \quad (3.4)$$

โดยที่ P คือ แรงกด (กิโลกรัม)

L คือ ระยะทอดข้าม (เซนติเมตร)

b คือ ความกว้างชิ้นงาน (เซนติเมตร)

d คือ ความหนาชิ้นงาน (เซนติเมตร)

สำหรับชิ้นงานแท่งหน้าตัดวงกลม (ทรงกระบอกตัน)

$$\text{โมดูลัสแตกร้าวด} = \frac{8PL}{\pi d^2} \times 0.098 \text{ (เมกะพาสคัล)} \quad (3.5)$$

โดยที่ P คือ แรงกด (กิโลกรัม)

L คือ ระยะทอดข้าม (เซนติเมตร)

d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางชิ้นงาน (เซนติเมตร)



รูปที่ 3.17 เครื่อง Tensile / Compression Strength Tester ยี่ห้อ Hung Ta รุ่น HT-8116

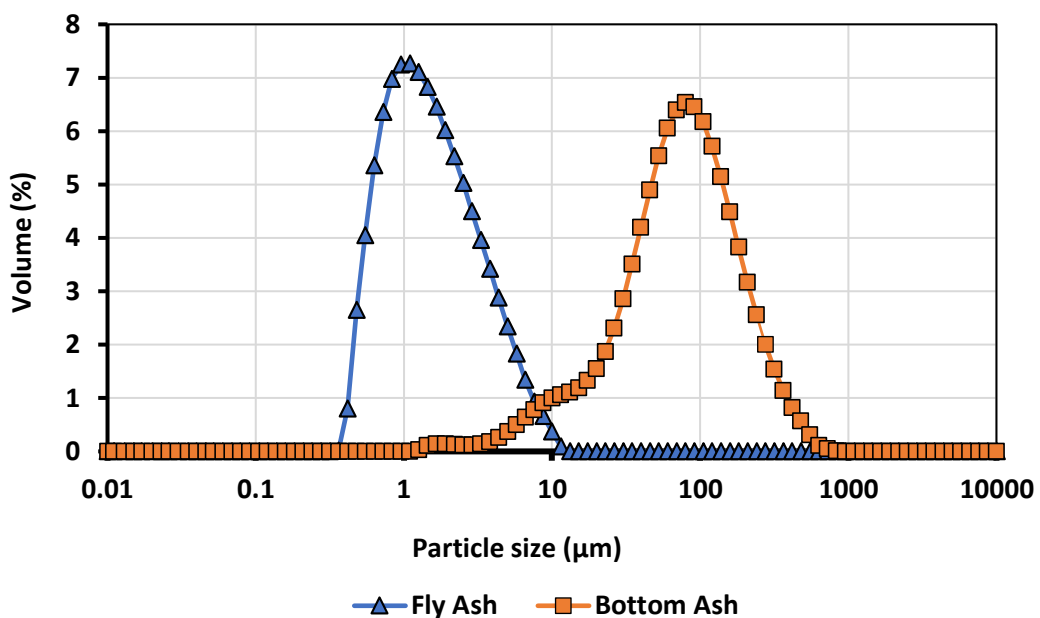


บทที่ 4 ผลการดำเนินงานวิจัย

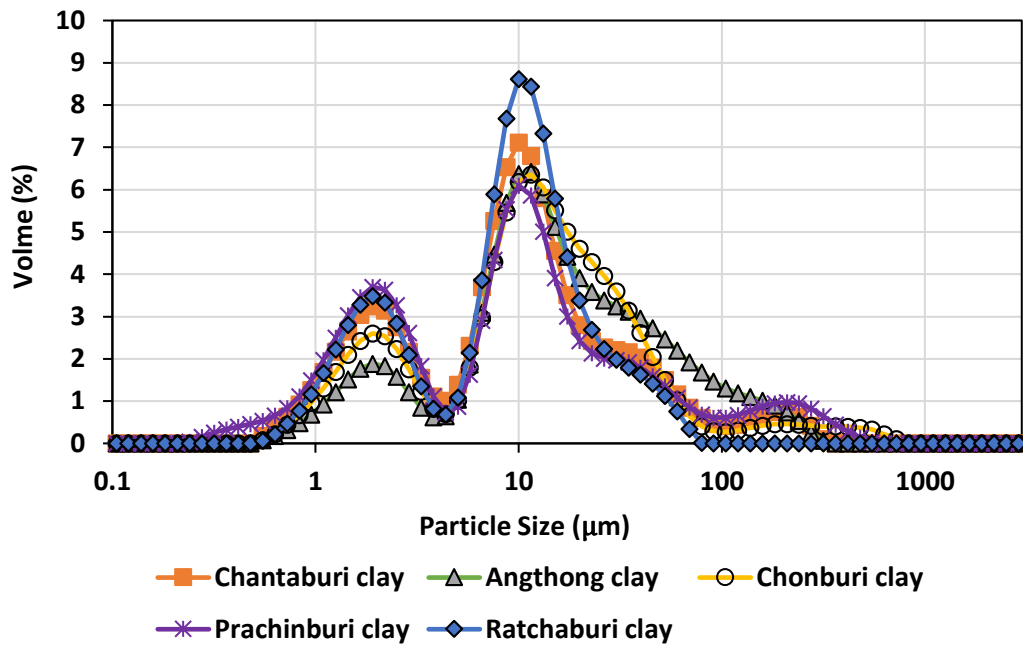
4.1 ลักษณะเฉพาะของวัสดุดิบ

4.1.1 การกระจายอนุภาค

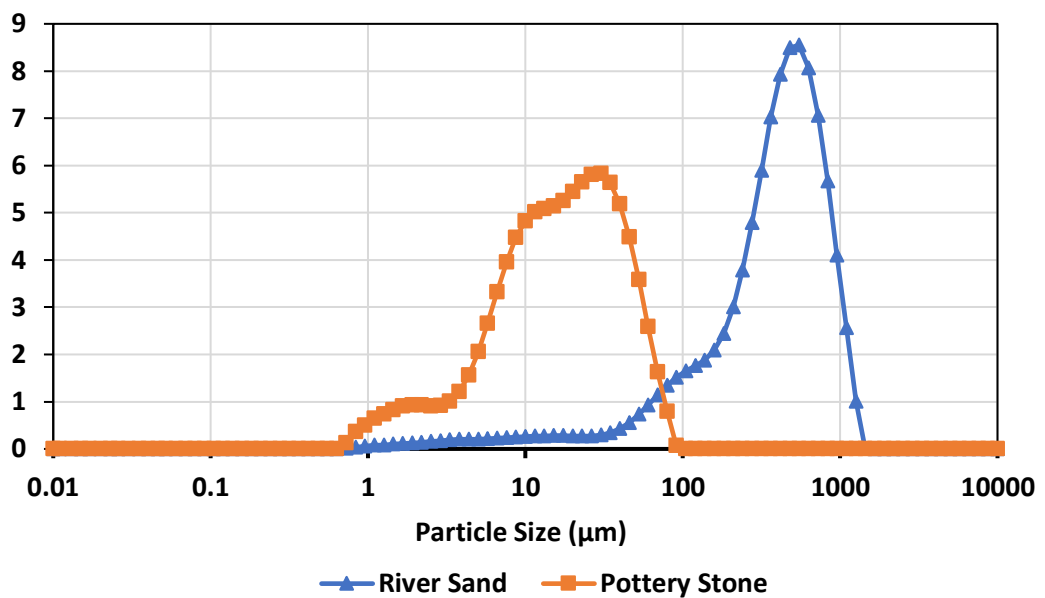
ผลจากการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของวัสดุดิบทั้งหมด พบว่าเถ้าลอยมีขนาดอนุภาคเล็กที่สุด **รูปที่ 4.1** โดยมีขนาดอนุภาคตำแหน่ง d50 ประมาณ 1.3 ไมโครเมตร เถ้าหนักประมาณ 70.1 ไมโครเมตร **รูปที่ 4.2** ดินทั้ง 5 ชนิดมีขนาดอนุภาคใกล้เคียงกัน มีกลุ่มขนาดของอนุภาคอยู่ 2 ช่วง คือ ประมาณ 1.5-2.5 ไมโครเมตร และประมาณ 8.7-15 ไมโครเมตร โดยดินเหนียวราชบุรี จันทบุรี อ่างทอง ชลบุรี และดินดำปราจีนบุรีมีขนาดอนุภาคตำแหน่ง d50 ประมาณ 9, 9.2, 13, 11.5 และ 8.8 ไมโครเมตรตามลำดับ **รูปที่ 4.3** ทราายน้จะมีขนาดใหญ่ ส่วนหินผุจะมีขนาดเล็ก โดยขนาดอนุภาคตำแหน่ง d50 ประมาณ 386.2 และ 15.9 ไมโครเมตรตามลำดับ ทราายน้จะมีขนาดใหญ่กว่า เนื่องจากการบดทราายน้จะต้องเสียค่าใช้จ่ายเพิ่มเติมจากบด จึงไม่นิยมบดทราายน้ให้ละเอียดมากเกินไป ขนาดอนุภาคจะส่งผลต่อสมบัติและลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานหลังผ่านการเผา



รูปที่ 4.1 การกระจายขนาดอนุภาคของเถ้าลอยและเถ้าหนัก



รูปที่ 4.2 การกระจายขนาดอนุภาคของดิน 5 ชนิด ได้แก่ ดินราชบุรี ดินจันทบุรี ดินอ่างทอง ดินชลบุรี และดินปราจีนบุรี

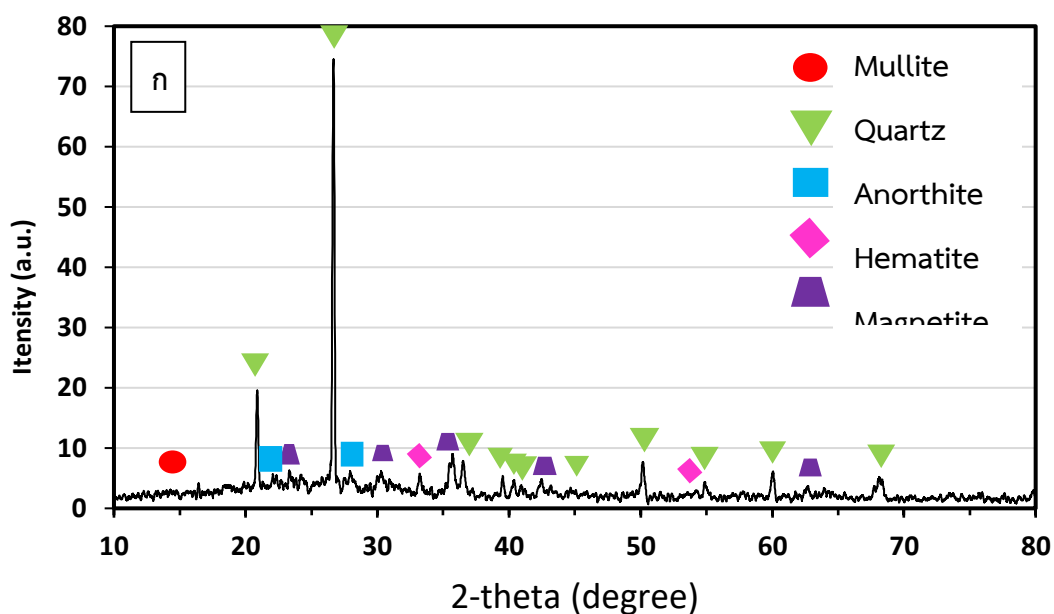


รูปที่ 4.3 การกระจายขนาดอนุภาคของหินผุและทรายแม่น้ำ

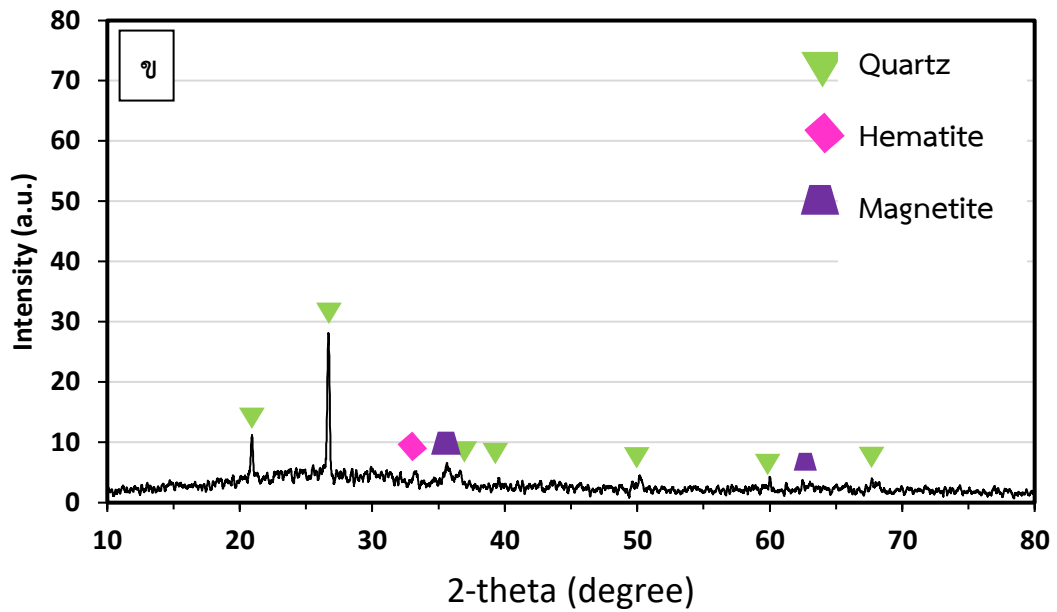
4.1.2 องค์ประกอบเฟสโครงสร้างผลึก

ถ้ำหนักและถ้ำลอยจะมีโครงสร้างผลึกบางอย่างเหมือนกัน **รูปที่ 4.4** เนื่องจากมาจากการเผาถ้ำนหินบิทูมินัสเหมือนกัน โดยจะมีเฟสควอตซ์ ฮีมาไทต์ และแมกนีไทต์เหมือนกัน แต่ถ้ำหนัก **รูปที่ 4.4 ก**) มีเฟสของอะนอร์ไทต์ และมุลไลต์เพิ่มเติมจากถ้ำลอย ผลการวิเคราะห์ของถ้ำหนักสอดคล้องกับโครงสร้างผลึกของถ้ำหนักบิทูมินัสจากโรงไฟฟ้าประเทศกรีซ [39] ซึ่งพบโครงสร้างผลึกของควอตซ์ ฮีมาไทต์ แมกนีไทต์ อะนอร์ไทต์ และมุลไลต์เช่นเดียวกัน โครงสร้างผลึกของถ้ำลอยที่พบสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ถ้ำลอยจากโรงไฟฟ้าคาตาลักซี (Çatalag˘zi) และ ซูโกซุ (Sugözü) ในประเทศตุรกี [40] โดยมีโครงสร้างผลึกมุลไลต์และควอตซ์เหมือนกัน แต่มีฮีมาไทต์เพิ่มเติม เช่นเดียวกับถ้ำลอยจากโรงไฟฟ้าเทอร์โมซิปา (Termozipa) ในประเทศโคลอมเบีย [41] พบว่ามีโครงสร้างผลึกมุลไลต์ ควอตซ์ ฮีมาไทต์ และแมกนีไทต์ นอกจากนี้เมื่อเทียบกับผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีใน **ตารางที่ 4.1** พบว่าประกอบด้วยซิลิกา อะลูมินา และเฟอริกออกไซด์เป็นหลัก สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึก โดยซิลิกาจะอยู่ในรูปของมุลไลต์ ควอตซ์ และอะนอร์ไทต์ อะลูมินาอยู่ในรูปของมุลไลต์และอะนอร์ไทต์ เฟอริกออกไซด์อยู่ในรูปของฮีมาไทต์และแมกนีไทต์

ควอตซ์และมุลไลต์หากผสมขึ้นรูปเป็นชิ้นงานจะทำหน้าที่เป็นโครงสร้างให้กับชิ้นงานทำให้ชิ้นงานแข็งแรง ฮีมาไทต์ทำให้ชิ้นงานหลังเผามีสีแดงชัดเจนขึ้น แมกนีไทต์ทำให้ชิ้นงานมีสีคล้ำดำขึ้น

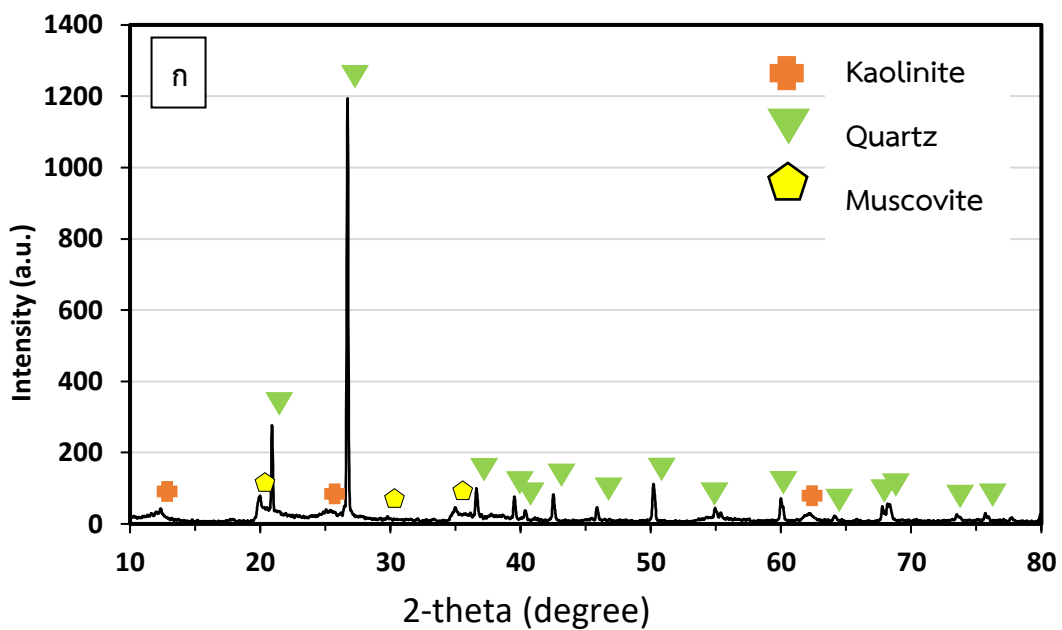


รูปที่ 4.4 โครงสร้างผลึกของวัตถุดิบก่อนผสมและเผา ก) ถ้ำหนัก และ ข) ถ้ำลอย

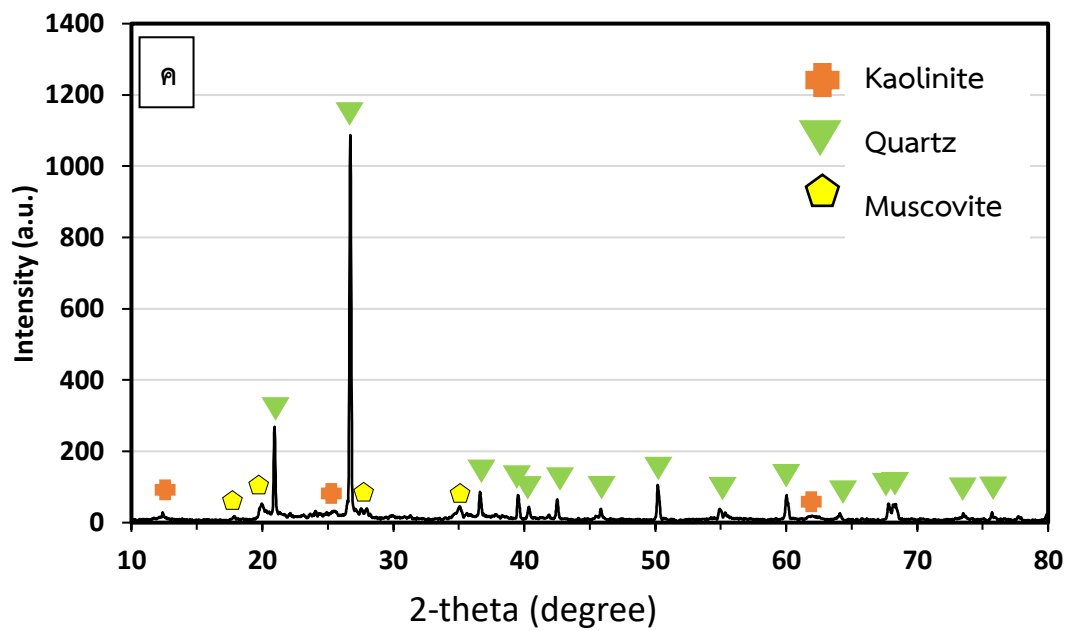
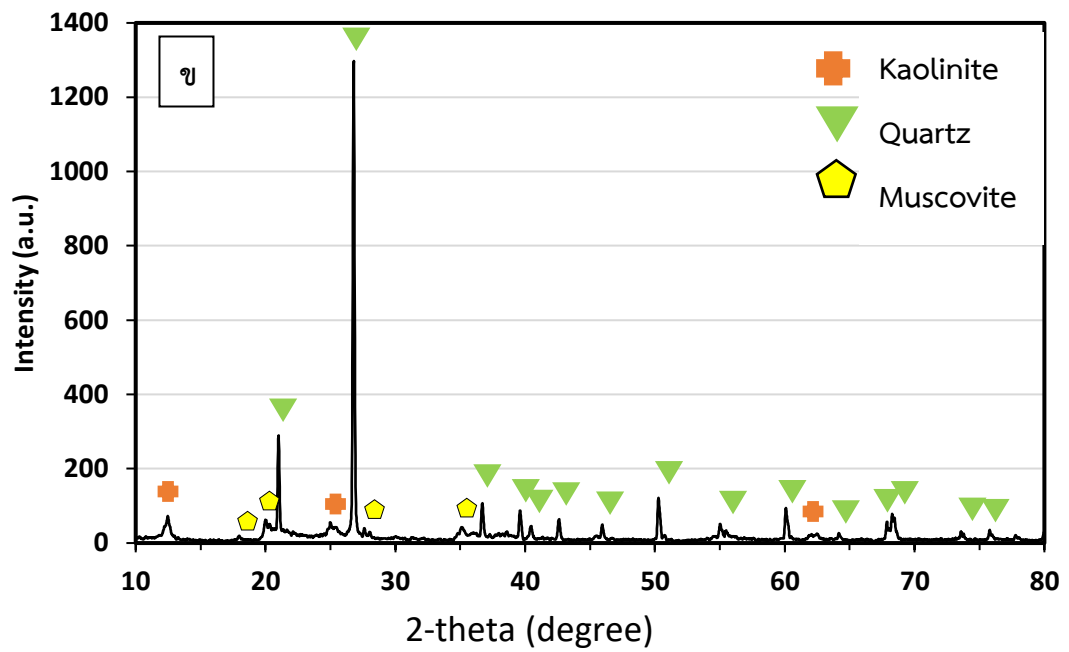


รูปที่ 4.4 โครงผลึกของวัตถุดิบก่อนผสมและเผา ก) เล้าหนัก และ ข) เล้าลอย (ต่อ)

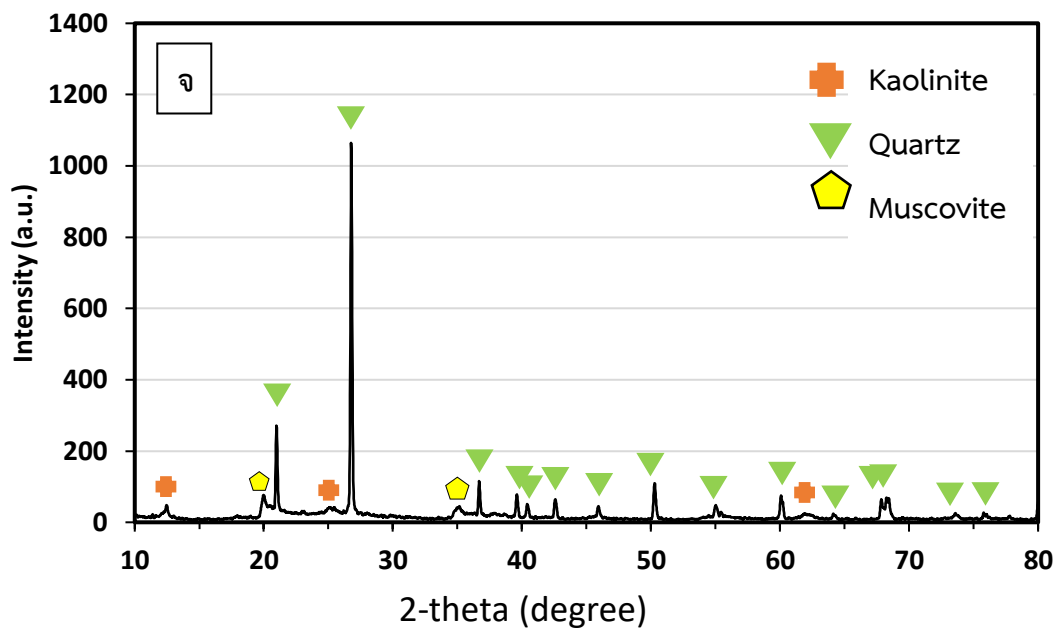
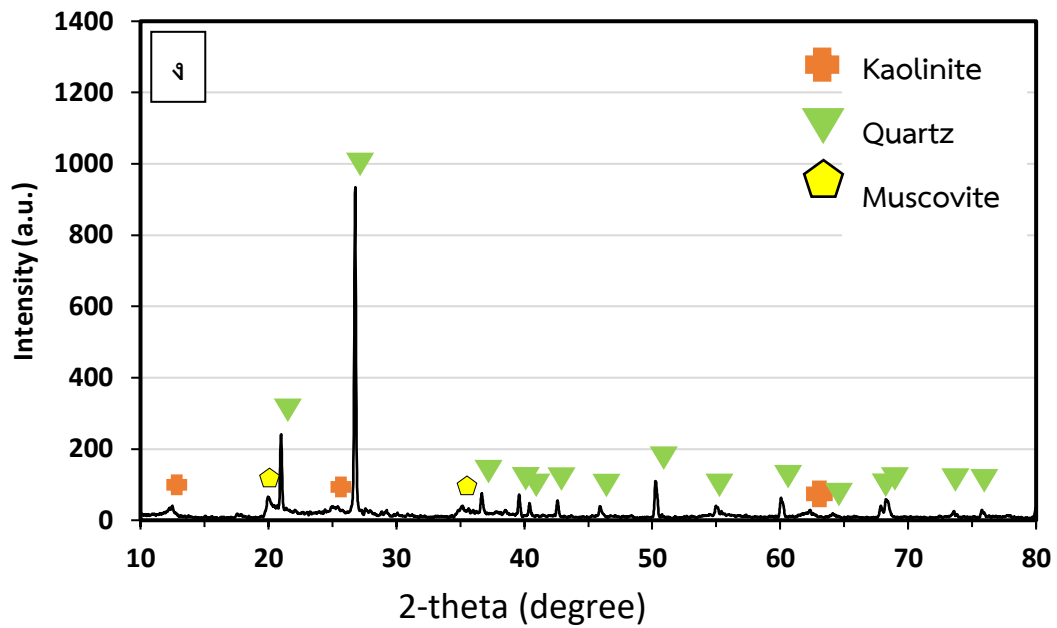
ดินเหนียวราชบุรี จันทบุรี อ่างทอง ชลบุรี และดินดำปราจีนบุรีมีโครงสร้างผลึกคล้ายกัน โดยจะประกอบด้วย เคโอลิไนต์ ควอตซ์ และมัสโคไวท์ โดยผลึกทั้ง 3 ชนิดจะทำหน้าที่เป็นโครงสร้างให้กับผลิตภัณฑ์



รูปที่ 4.5 โครงผลึกของดินที่ใช้ในงานวิจัย ก) ดินเหนียวราชบุรี ข) ดินเหนียวจันทบุรี ค) ดินเหนียวอ่างทอง ง) ดินเหนียวชลบุรี และ จ) ดินดำปราจีนบุรี



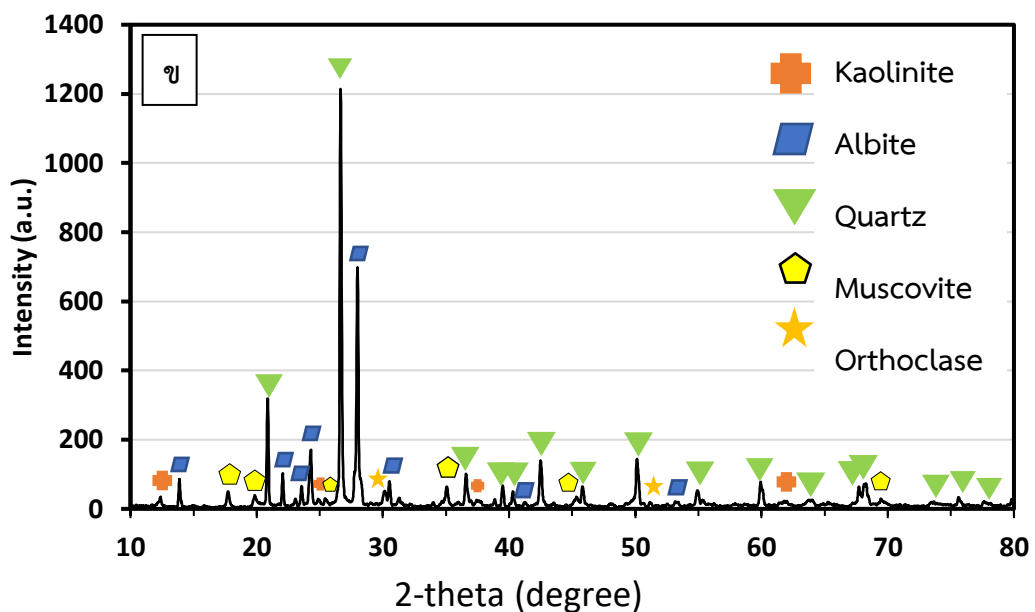
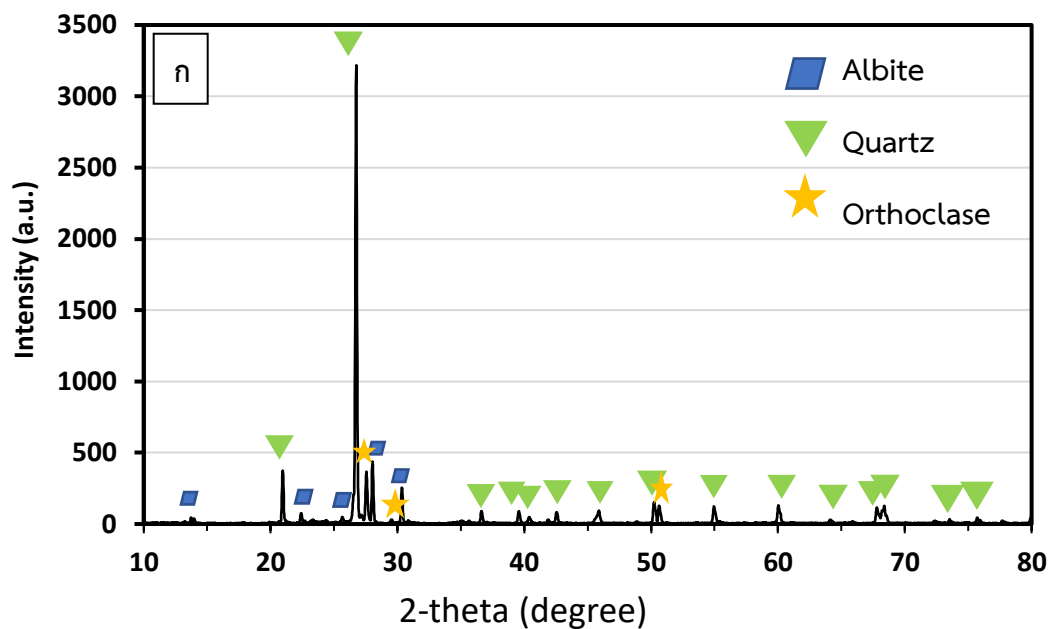
รูปที่ 4.5 โครณผลึกของดินที่ใช้ในงานวิจัย ก) ดินเหนียวราชบุรี ข) ดินเหนียวจันทบุรี ค) ดินเหนียวอ่างทอง ง) ดินเหนียวชลบุรี และ จ) ดินดำปราจีนบุรี (ต่อ)



รูปที่ 4.5 โครงผลึกของดินที่ใช้ในงานวิจัย ก) ดินเหนียวราชบุรี ข) ดินเหนียวจันทบุรี ค) ดินเหนียวอ่างทอง ง) ดินเหนียวชลบุรี และ จ) ดินดำปราจีนบุรี (ต่อ)

รูปที่ 4.6 ก) ทราเยมน้ำจะประกอบด้วยควอตซ์เป็นหลัก ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นเนื้อผลิตภัณฑ์รองลงมาได้แก่อัลไบต์และออร์โทเคลส หรือโซเดียมเฟลด์สปาร์และโพแทสเซียมเฟลด์สปาร์ โซเดียมเฟลด์สปาร์มีจุดหลอมเหลวที่ 1100-1120 °C [42] อาจมีผลทำให้ลดจุดสุกตัวลงเล็กน้อยสำหรับชั้นงานที่เผาที่อุณหภูมิ 1100-1200 °C ส่วนโพแทสเซียมเฟลด์สปาร์มีจุดหลอมเหลวที่ 1250 °C [43]

สูงกว่าอุณหภูมิที่ใช้เผา ดังนั้นไม่ได้ช่วยลดจุดสุกตัวโดยตรง แต่อาจมีผลหากเกิดจุดยูเทคติกขององค์ประกอบทางเคมีหลายตัวขณะเผา อย่างไรก็ตามวัสดุประสงค์หลักที่ผลิตภัณฑ์เซรามิกต้องผสมทรายคือการใช้เพื่อลดความเหนียวขณะขึ้นรูป ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงไม่ได้เน้นการลดจุดสุกตัวจากอัลไบต์และออร์โทเคลสในทราย **รูปที่ 4.6 ข)** หินผุจะมีโครงผลึกคล้ายคลึงกับทราย แต่มีเคโอลิไนต์และมัสโคไวต์เพิ่มเติมมาซึ่งจะช่วยเป็นโครงสร้างให้กับชิ้นงานเหมือนกับดิน เนื่องจากหินผุและดินต่างเกิดขึ้นจากการแปลงสภาพของหิน ต่างตรงที่ดินจะมีการสะสมตัวของซากพืชทำให้มีสารอินทรีย์สูงกว่า



รูปที่ 4.6 โครงผลึกของวัสดุดิบตัวเติม ก) ทรายแม่น้ำ และ ข) หินผุ

4.1.3 องค์ประกอบทางเคมี

เถ้านักและเถ้าลอยจะมีซิลิกา (SiO_2) อะลูมินา (Al_2O_3) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) เป็นองค์ประกอบหลัก มีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) และแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) รองลงมาตามลำดับ สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์โครมพลิก โดยซิลิกาอยู่ในรูปของผลึกควอตซ์ อยู่ร่วมกับอะลูมินาในรูปของมุลไลต์และอะนอร์ไทต์ เฟอร์ริกออกไซด์อยู่ในรูปของฮีมาไทต์ แคลเซียมออกไซด์อยู่ในรูปของอะนอร์ไทต์ มีซิลิกาประมาณ 50-55 wt% อะลูมินา 15-22 wt% เฟอร์ริกออกไซด์ประมาณ 10-12 wt% และแคลเซียมออกไซด์ประมาณ 4-6 wt% คล้ายคลึงกับเถ้าลอยบิทุมินัสจากโรงไฟฟ้าอีราริง (Eraring Power Station) [44] ในประเทศออสเตรเลีย โรงไฟฟ้า Çatalagzi และ Sugözü ในประเทศตุรกี [45] แต่จะมีปริมาณอะลูมินาน้อยกว่าและมีปริมาณเฟอร์ริกออกไซด์สูงกว่าอย่างไรก็ตาม เถ้าถ่านหินบิทุมินัสทั้ง 2 ชนิดจากกลุ่มบริษัทโกลร่วอยู่ในเกณฑ์ปกติของเถ้าถ่านหินบิทุมินัสซึ่งจะมีซิลิกาอยู่ระหว่าง 20-60 wt% อะลูมินา 5-35 wt% เฟอร์ริกออกไซด์ 10-40 wt% และแคลเซียมออกไซด์ 1-12 wt% [46] นอกจากนี้พบว่าเถ้าลอยบิทุมินัสมีปริมาณซิลิกา อะลูมินา และเฟอร์ริกออกไซด์รวมกันสูงกว่า 70 wt% จัดอยู่ในคลาส F ตามมาตรฐาน ASTM C618 [15]

ทรายแม่น้ำจะประกอบด้วยซิลิกาเป็นหลักซึ่งอยู่ในรูปของควอตซ์ หินผุมีซิลิกาและอะลูมินาเป็นองค์ประกอบหลักอยู่ในรูปของควอตซ์ อัลไบต์และมัสโคไวท์ มีโซเดียมออกไซด์เป็นองค์ประกอบรองลงมาซึ่งจะอยู่ในรูปของอัลไบต์ มีซิลิกาประมาณ 70 wt% อะลูมินา 17 wt% และโซเดียมออกไซด์ 5 wt%

ดินทั้ง 5 ชนิด ได้แก่ ดินเหนียวราชบุรี จันทบุรี อ่างทอง ชลบุรี และดินดำปราจีนบุรีจะมีองค์ประกอบคล้ายคลึงกับเถ้าลอยและเถ้านัก มีซิลิกา อะลูมินาและเฟอร์ริกออกไซด์เป็นองค์ประกอบหลัก แต่จะมีปริมาณเฟอร์ริกออกไซด์น้อยกว่า ซิลิกาอยู่ในรูปของควอตซ์ อยู่ร่วมกับอะลูมินาในรูปเคโอลิไนต์และมัสโคไวท์ มีซิลิกาประมาณ 55-67 wt% อะลูมินา 18-23 wt% และเฟอร์ริกออกไซด์ประมาณ 3-5 wt%

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ

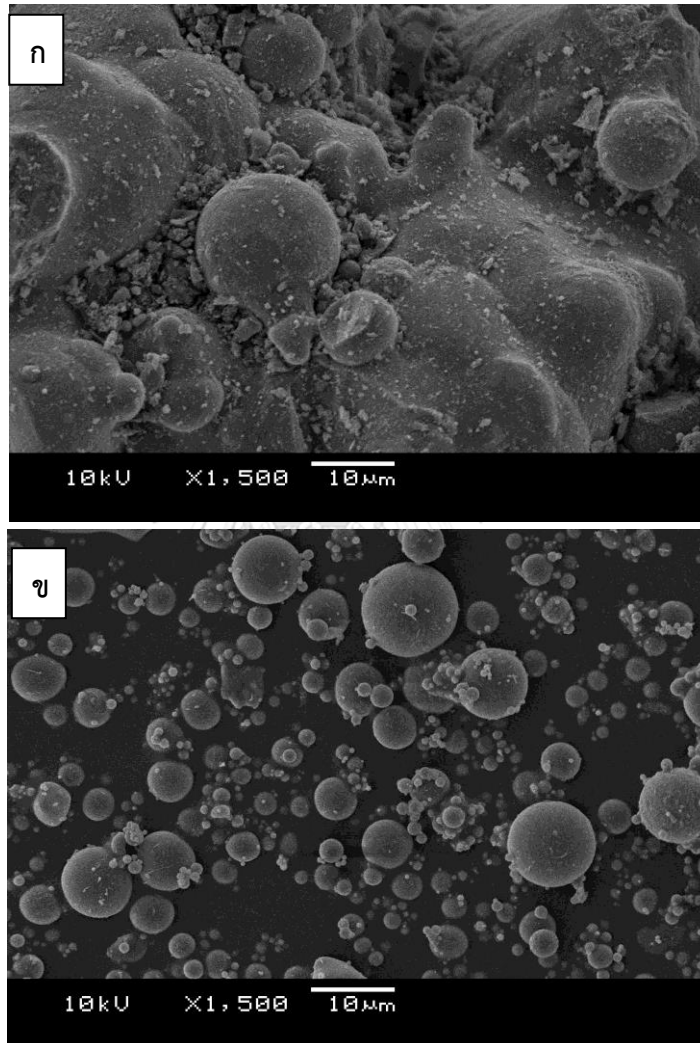
องค์ประกอบเคมี	เถ้าหนัก (wt%)	เถ้าลอย (wt%)	ทรายแม่น้ำ (wt%)	หินผุ (wt%)
SiO ₂	50.30	52.90	64.31	69.90
Al ₂ O ₃	15.80	22.00	21.62	17.60
Fe ₂ O ₃	11.90	10.60	5.51	0.64
CaO	4.03	5.22	0.61	0.16
MgO	2.01	3.26	1.34	0.27
K ₂ O	1.51	1.95	2.43	2.02
TiO ₂	0.77	0.86	0.87	<0.01
Na ₂ O	0.45	0.82	0.53	4.65
SO ₃	0.21	0.91	0.14	-
P ₂ O ₅	0.15	0.27	0.13	-
องค์ประกอบอื่น	0.22	0.25	<0.01	<0.01
Loss on ignition	12.98	4.17	2.50	14.04

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ (ต่อ)

องค์ประกอบเคมี	ดินเหนียวราชบุรี (wt%)	ดินเหนียวจันทบุรี (wt%)	ดินเหนียวอ่างทอง (wt%)	ดินเหนียวชลบุรี (wt%)	ดินดำปราจีนบุรี (wt%)
SiO ₂	58.60	66.50	57.70	56.30	68.00
Al ₂ O ₃	20.90	22.10	19.40	20.60	18.50
Fe ₂ O ₃	3.93	3.87	4.94	5.03	3.25
CaO	0.54	0.13	0.55	0.14	0.14
MgO	0.58	0.46	1.20	0.58	0.74
K ₂ O	1.10	1.43	2.18	1.42	1.54
TiO ₂	0.99	1.12	0.78	0.86	0.91
Na ₂ O	0.22	0.22	0.48	0.27	0.27
SO ₃	0.70	<0.01	0.13	0.74	0.13
P ₂ O ₅	<0.01	<0.01	0.12	<0.01	<0.01
องค์ประกอบอื่น	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
Loss on ignition	12.42	4.17	12.94	14.04	6.60

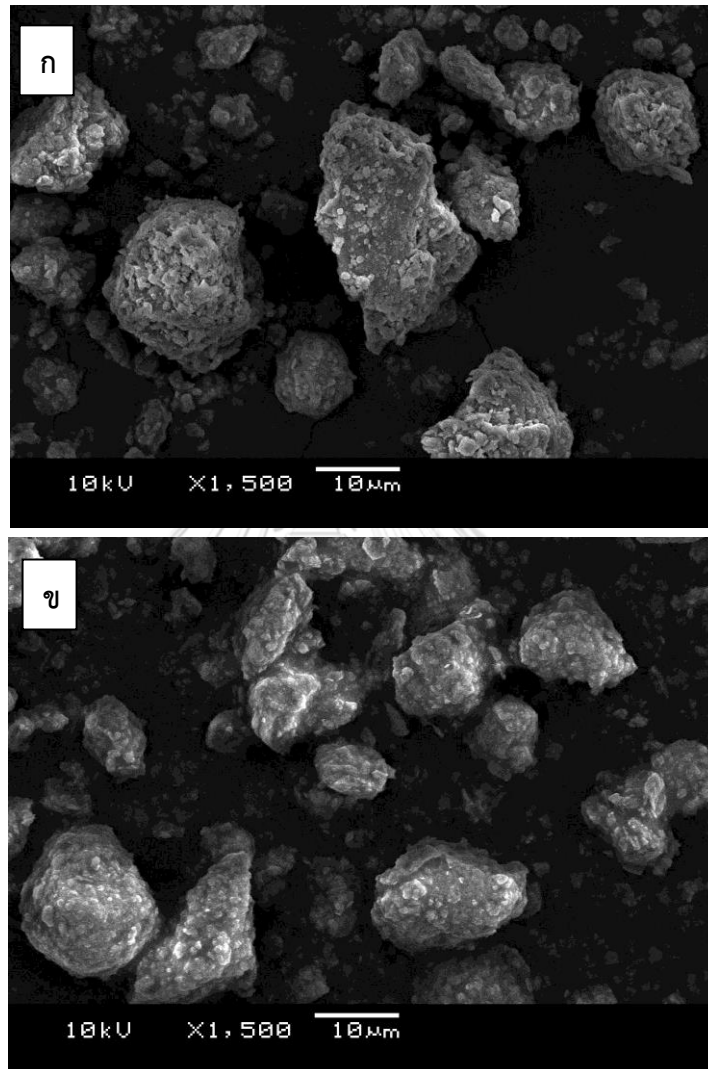
4.1.4 โครงสร้างจุลภาค

ถ้ำหนักและถ้ำลอยมีลักษณะเป็นทรงกลม ถ้ำหนักจะมีขนาดใหญ่กว่าถ้ำลอยเกาะกันเป็นแพ รวมไปถึงมีเศษขนาดเล็กปนมาบางส่วน **รูปที่ 4.7 ก)** ในขณะที่ถ้ำลอยจะอยู่แบบกระจาย กระจาย ไม่ติดกัน ไม่เกาะกัน **รูปที่ 4.7 ข)** สอดคล้องกับถ้ำลอยปิทุมันส์จากโรงไฟฟ้า Termozipa ในประเทศโคลอมเบีย [41]

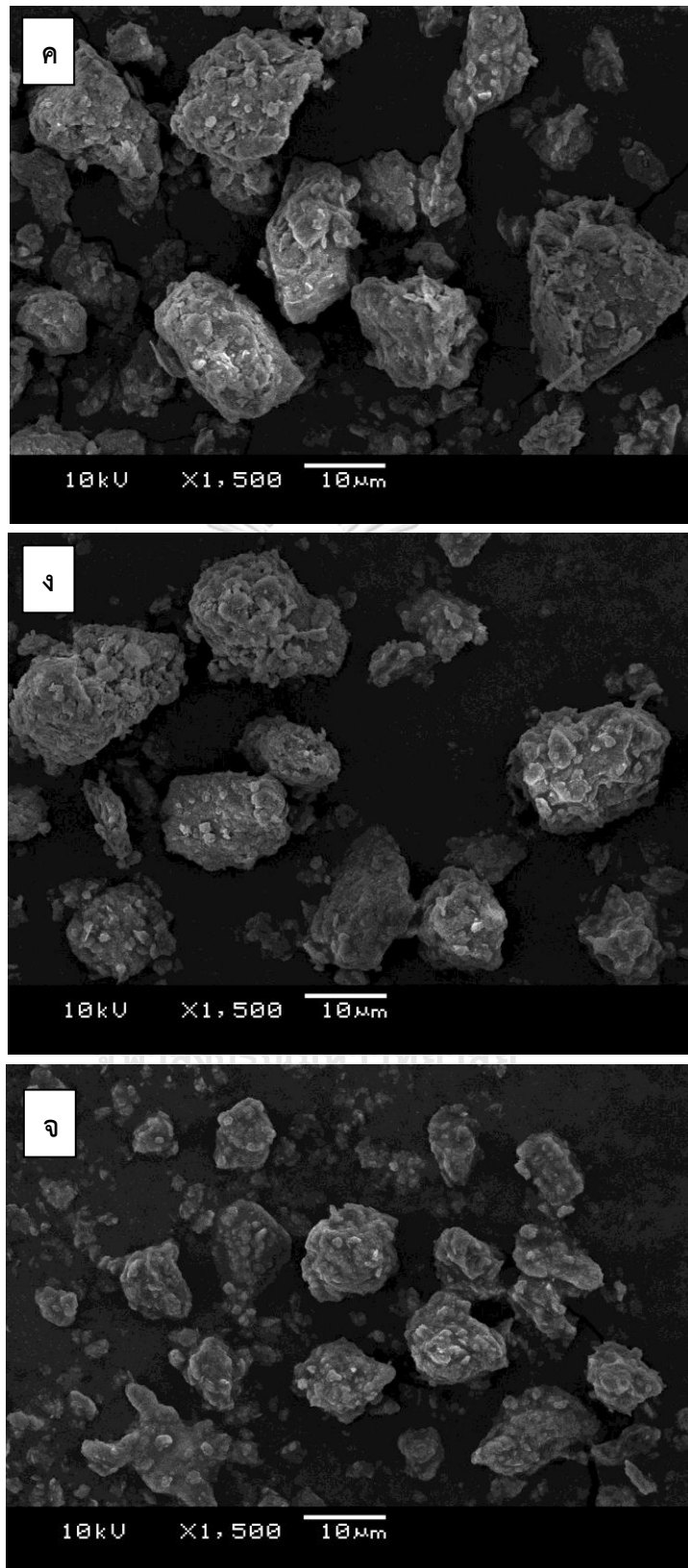


รูปที่ 4.7 โครงสร้างจุลภาคของถ้ำถ้ำหนักปิทุมันส์ ก) ถ้ำหนัก และ ข) ถ้ำลอย

ดินทั้ง 5 ชนิดจะมีลักษณะเป็นก้อน กระจายตัวกันอยู่ ไม่ติดกันเป็นแพ ไม่มีรูปร่างแน่นอน และมีขนาดใกล้เคียงกัน สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดอนุภาค **รูปที่ 4.1 ข)** ซึ่งจากกราฟจะเห็นว่า มีขนาดอนุภาคใกล้เคียงกัน และการกระจายขนาดอนุภาคใกล้เคียงกัน



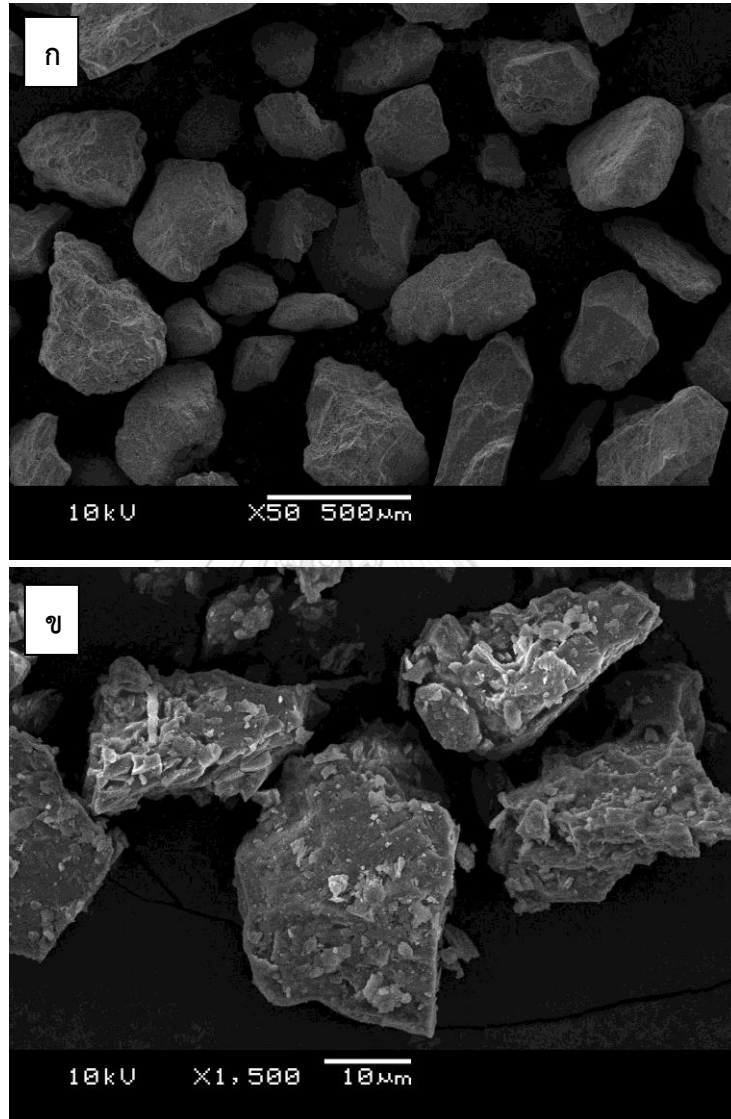
รูปที่ 4.8 โครงสร้างจุลภาคของดินทั้ง 5 ชนิด ก) ดินเหนียวราชบุรี ข) ดินเหนียวจันทบุรี
ค) ดินเหนียวอ่างทอง ง) ดินเหนียวชลบุรี และ จ) ดินดำปราจีนบุรี



รูปที่ 4.8 โครงสร้างจุลภาคของดินทั้ง 5 ชนิด ก) ดินเหนียวราชบุรี ข) ดินเหนียวจันทบุรี
ค) ดินเหนียวอ่างทอง ง) ดินเหนียวชลบุรี และ จ) ดินดำปราจีนบุรี (ต่อ)

ทรายแม่น้ำจะมีขนาดใหญ่ รูปร่างไม่แน่นอน ไม่เกาะติดกัน ส่วนหินผุจะมีขนาดเล็กกว่าทราย รูปร่างไม่แน่นอน ที่ผิวมีความขรุขระเล็กน้อย ไม่เกาะติดกัน

รูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 โครงสร้างจุลภาคของวัตถุดิบตัวเดิม ก) ทรายแม่น้ำ และ ข) หินผุ

โดยภาพรวมของวัตถุดิบทั้ง 9 ชนิด ถ้าล่อยจะมีขนาดอนุภาคเล็กที่สุด มีค่า d_{50} อยู่ที่ 1.3 ไมครอน ดินทั้ง 5 ชนิดมีขนาดอนุภาคใกล้เคียงกัน มีค่า d_{50} อยู่ในช่วง 8-12 ไมครอน และขนาดเล็กกว่าเถ้าหนักซึ่งจะมีค่า d_{50} อยู่ที่ 70.1 ไมครอน ทรายแม่น้ำจะมีขนาดใหญ่ที่สุด ($d_{50} = 386.2$ ไมครอน) เนื่องจากร่อนผ่าน 16 เมช ความแตกต่างของขนาดอนุภาคจะส่งผลต่อสมบัติของชั้นงานที่ขึ้นรูปและเผา

ในด้านโครงสร้างผลึกวัสดุดิบ ทุกชนิดจะมีควอตซ์เป็นองค์ประกอบ ในดินจะมีโคโลไนต์และมัสโคไวท์เพิ่มเติม ทำหน้าที่เป็นเนื้อผลิตภัณฑ์ให้กับชิ้นงาน ในถ้ำหนักมีเฟสฮีมาไทต์ซึ่งช่วยให้ชิ้นงานมีสีแดงสดมากขึ้น แต่ทั้งถ้ำหนักและถ้ำลอยจะมีแมกนีไทต์อาจทำให้ผิวชิ้นงานคล้ำหรือดำขึ้น

องค์ประกอบทางเคมีโดยรวมจะมีซิลิกา อะลูมินาเป็นองค์ประกอบหลักอยู่ในช่วง 50-70 wt% และ 15-25 wt% ในถ้ำทั้ง 2 ชนิดจะมีเฟอริกออกไซด์อยู่ประมาณ 10-12 wt% :ซึ่งคาดว่าอยู่ในรูปของเฟสฮีมาไทต์ นอกจากนี้ยังพบซัลไฟต์ (SO_3) อยู่ในถ้ำหนักและถ้ำลอยมากกว่า 0.1 wt% ทำให้ไม่ควรใช้วิธีการหล่อแบบ (Slip casting) เนื่องจากการมีปริมาณซัลเฟตมากจะทำให้น้ำดินตกตะกอนเร็ว ทำให้ควบคุมคุณภาพน้ำดินยาก ดังนั้นกระบวนการขึ้นรูปจึงเป็นการอัดด้วยระบบไฮดรอลิกหรือการอัดรีดที่ใช้น้ำน้อยกว่าการหล่อแบบแทน

จากรูปโครงสร้างจุลภาคพบว่าวัสดุดิบเกือบทุกชนิดไม่เกาะกันเป็นแพ กระจายตัวดี ยกเว้นถ้ำหนัก ทำให้ง่ายต่อการผสมเนื่องจากอนุภาคของวัสดุดิบจะกระจายไปทั่วถึงก่อนดินส่วนผสมจากผลวิเคราะห์ที่กล่าวมาข้างต้น ทางผู้วิจัยจึงได้เลือกใช้การผสมด้วยมือธรรมดาจนเกิดเป็นก้อนดินผสม ใช้วิธีการอัดไฮดรอลิกและอัดรีดขึ้นงานในการขึ้นรูป โดยตั้งสมมติฐานว่าการผสมถ้ำหนักและถ้ำลอยจะทำให้สมบัติด้านความแข็งแรง การดูดซึมน้ำและการหดตัวของชิ้นงานมีค่าใกล้เคียงหรือดีขึ้นกว่าสูตรมาตรฐานเดิมที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม และชิ้นงานมีสีแดงสดมากขึ้น

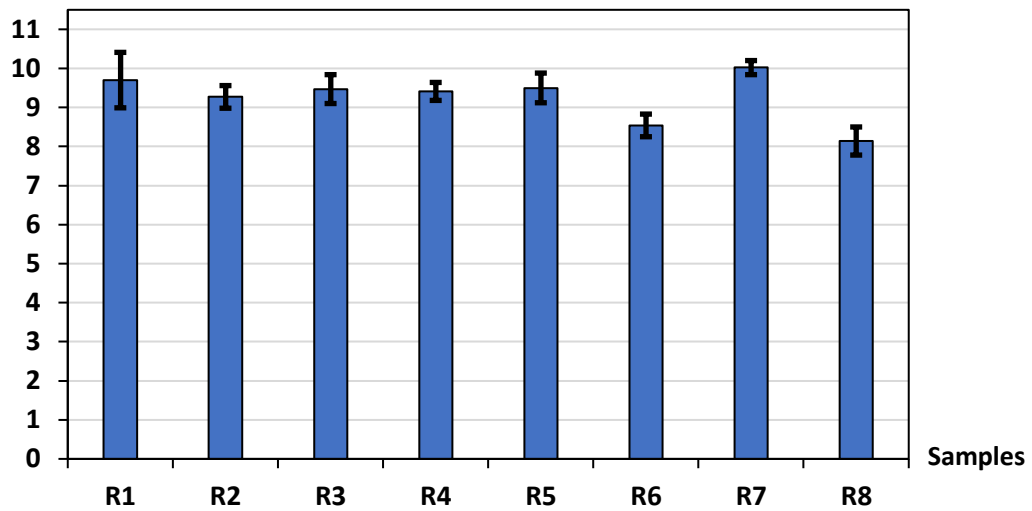
4.2 ผลของถ้ำถ่านหินปิทูมินัสต่อสมบัติของชิ้นงานตัวอย่างผลิตภัณฑ์เซรามิก

4.2.1 การหดตัวของชิ้นงานเมื่อแห้ง (Drying Shrinkage)

- ชิ้นงานดินเหนียวราชบุรี

ผลของการวิเคราะห์ค่าการหดตัวของชิ้นงานดินเหนียวราชบุรี รูปที่ 4.10 พบว่าชิ้นงานดินเหนียวราชบุรีเมื่อผสมถ้ำหนักหรือถ้ำลอย 10 wt% (R5 และ R7) ชิ้นงานจะหดตัวใกล้เคียงกับสูตรอ้างอิงที่ผสมทรายแม่น้ำ 10 wt% (R3) หากปริมาณสัดส่วนถ้ำหนักหรือถ้ำลอยเพิ่มขึ้นเป็น 20 wt% (R6 และ R8) ชิ้นงานหดตัวเมื่อแห้งลดลงประมาณ 1-2 %

Drying Shrinkage (%)

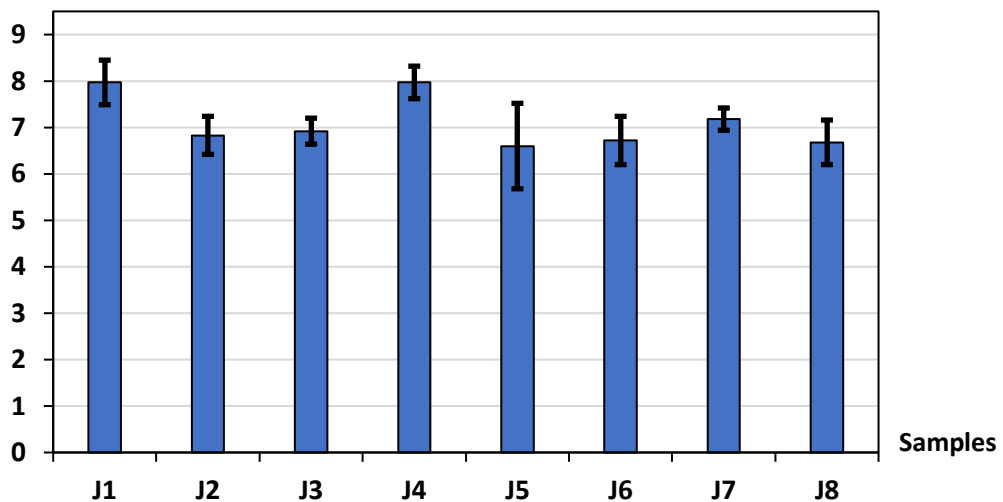


รูปที่ 4.10 ค่าการหดตัวของชิ้นงานเมื่อแห้งของชิ้นงานดินเหนียวราชบุรี

- ชิ้นงานดินเหนียวจันทบุรี

ผลของการวิเคราะห์ค่าการหดตัวของชิ้นงานดินเหนียวจันทบุรี รูปที่ 4.11 พบว่าชิ้นงานดินเหนียวจันทบุรีเมื่อผสมเถ้าลอยหรือเถ้าหนัก 10 หรือ 20 wt% (J5-J8) ชิ้นงานจะมีการเปลี่ยนแปลงเรื่องการหดตัวเพียงเล็กน้อย (น้อยกว่า 1%)

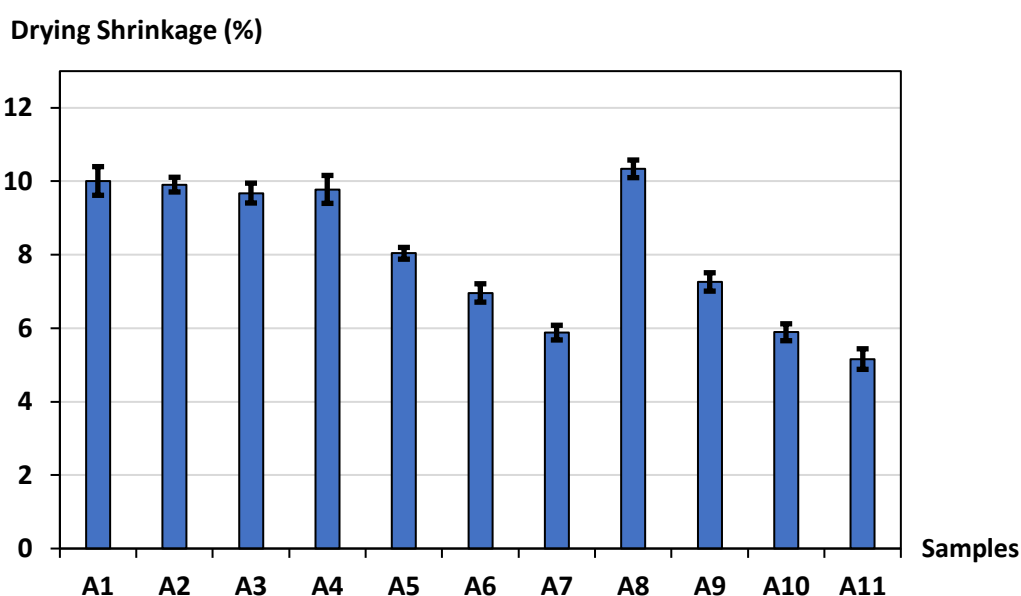
Drying Shrinkage (%)



รูปที่ 4.11 ค่าการหดตัวของชิ้นงานเมื่อแห้งของชิ้นงานดินเหนียวจันทบุรี

- ชีงงานดินเหนียวอ่างทอง

ผลของการวิเคราะห์ค่าการหดตัวของชีงงานดินเหนียวอ่างทอง รูปที่ 4.12 พบว่าเมื่อผสมเถ้าหนักหรือเถ้าลอย 10 wt% (A4 และ A8) ชีงงานจะมีค่าการหดตัวเมื่อแห้งใกล้เคียงกับชีงงานสูตรอ้างอิงที่ผสมทรายแม่น้ำ 10 wt% (A2) และชีงงานจะหดตัวลดลง 2-5% เมื่อปริมาณเถ้าหนักและเถ้าลอยเป็น 20, 30 และ 40 wt% (A5, A6, A7 และ A9, A10, A11)

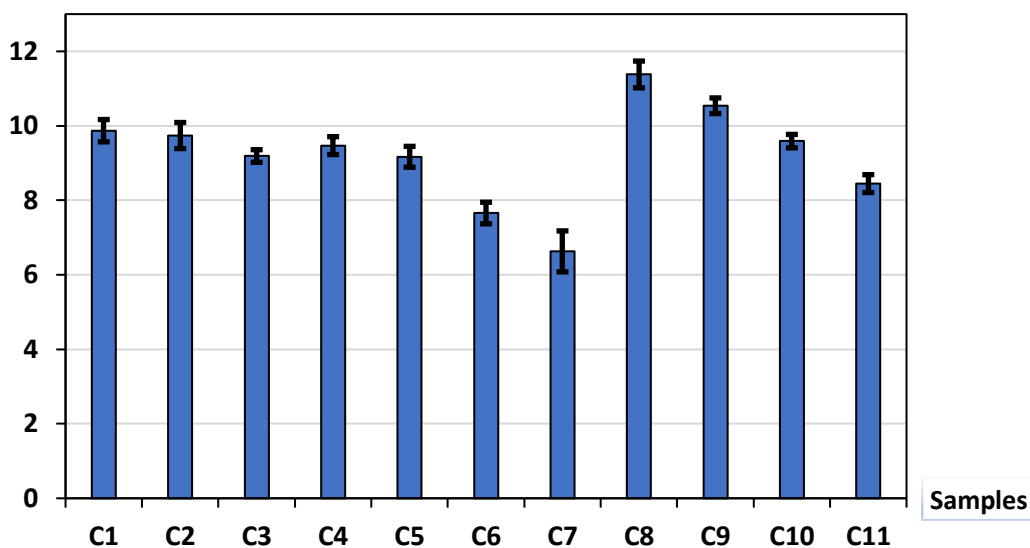


รูปที่ 4.12 ค่าการหดตัวของชีงงานเมื่อแห้งของชีงงานดินเหนียวอ่างทอง

- ชีงงานเหนียวชลบุรี

ผลของการวิเคราะห์ค่าการหดตัวของชีงงานดินเหนียวชลบุรี รูปที่ 4.13 พบว่าเมื่อผสมเถ้าหนักจะมีแนวโน้มใกล้เคียงกับดินเหนียวอ่างทอง โดยชีงงานที่ผสมเถ้าหนัก 10 และ 20 wt% (C4 และ C5) จะมีค่าการหดตัวใกล้เคียงกับชีงงานอ้างอิงที่ผสมทรายน้ำ (C2) หากปริมาณเถ้าหนักเพิ่มขึ้นเป็น 30 และ 40 wt% (C6 และ C7) ชีงงานจะหดตัวลดลง 2-3 % เมื่อผสมเถ้าลอย 10 wt% (C8) ชีงงานจะมีค่าหดตัวเมื่อแห้งใกล้เคียงกับสูตรอ้างอิงที่ผสมทรายแม่น้ำ 10 wt%-(C3) ชีงงานกลับหดตัวเพิ่มขึ้น และหดตัวลดลงเมื่อปริมาณเถ้าลอยสูงขึ้นจนเมื่อผสมเถ้าลอย 40 wt% (C11) ชีงงานจึงหดตัวลดลงประมาณ 1.6 % เมื่อเทียบกับชีงงานสูตรอ้างอิง

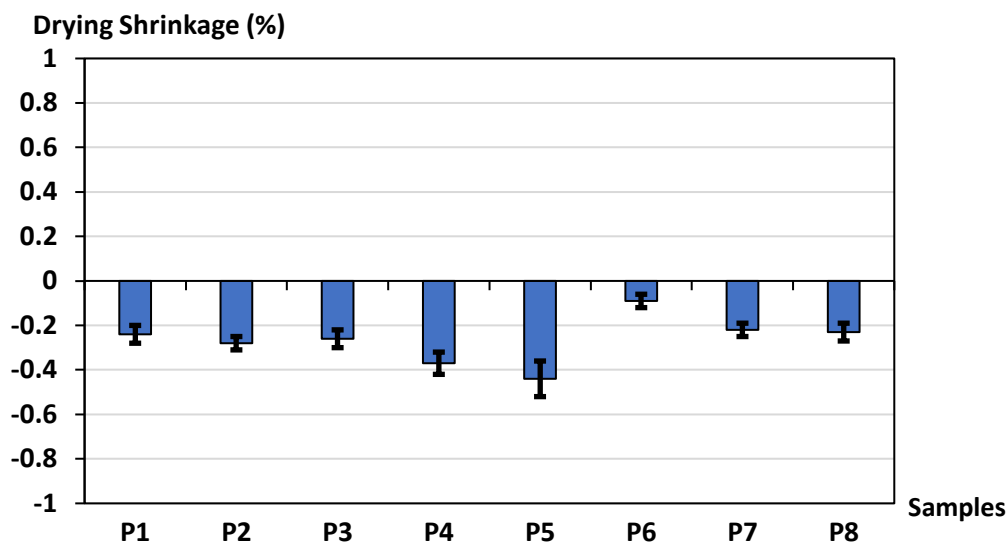
Drying Shrinkage (%)



รูปที่ 4.13 ค่าการหดตัวของชิ้นงานเมื่อแห้งของชิ้นงานดินเหนียวชลบุรี

- ชิ้นงานดินดำปราจีนบุรี

ผลของการวิเคราะห์ค่าการหดตัวของชิ้นงานดินดำปราจีนบุรี รูปที่ 4.14 พบว่าเมื่อผสมหินผุ ถ้ำหนักและถ้ำล่อยกับดินดำปราจีนบุรีแล้วนำไปอัดขึ้นรูป ชิ้นงานกลับมีการขยายตัวเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แทนที่จะหดตัว คาดว่าเกิดจากปรากฏการณ์ดีดย้อนกลับ (Springback) ซึ่งเป็นปรากฏการณ์เมื่อวัตถุ ถูกแรงอัดหรือดัดจนเสียรูปร่างแบบชั่วคราวหรือถาวร วัตถุจะพยายามจะเปลี่ยนแปลงรูปร่างกลับมา เป็นลักษณะก่อนถูกแรงกระทำเพื่อกลับสู่สมดุล ในตอนแรกดินผสมอยู่ในลักษณะกระจายตัว เมื่อ ได้รับแรงอัดจนรวมกันเป็นรูปร่างจึงพยายามจะกระจายตัวออกกลับเป็นเหมือนเดิม อย่างไรก็ตาม อนุภาคดินผสมจัดเป็นวัสดุที่มีความยืดหยุ่นต่ำ การกระจายตัวกลับสู่รูปร่างเดิมจึงเกิดเพียงเล็กน้อย เมื่อชิ้นงานผสมถ้ำหนักเพิ่มขึ้น (P3-P5) ชิ้นงานจะขยายตัวเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับการผสมถ้ำล่อย ปริมาณถ้ำล่อยเพิ่มขึ้น (P6-P8) ชิ้นงานมีแนวโน้มขยายตัวเพิ่มขึ้นเช่นกัน



รูปที่ 4.14 ค่าการหดตัวของชิ้นงานเมื่อแห้งของชิ้นงานดินดำปราจีนบุรี

ผลจากการวิเคราะห์การหดตัวเมื่อแห้งของดินเหนียวราชบุรี จันทบุรี อ่างทองและชลบุรี พบว่าการผสมเถ้าหนักและเถ้าลอยแทนที่ทรายแม่น้ำ หากสัดส่วนของเถ้าเพิ่มขึ้นจะทำให้ชิ้นงานหดตัวลดลงเมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ผสมทรายแม่น้ำ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Utasarga C. [47] ซึ่งใช้ดินจากแม่น้ำเจียปานี (Jhirpani) ประเทศอินเดียผสมเถ้าลอย เมื่อสัดส่วนของเถ้าลอยเพิ่มขึ้นเป็น 10, 20, 30,..., 70 wt% ค่าการหดตัวของชิ้นงานเมื่อแห้งจะลดลง เมื่อผสมเถ้าลอยซึ่งมีขนาดอนุภาคเล็กละเอียดจะทำให้ในขณะที่ยัด อนุภาคของเถ้าจะแทรกเข้าไปในเนื้อของชิ้นงานได้ดี ดังนั้นชิ้นงานที่ผสมเถ้าจึงแน่นตัวกว่าชิ้นงานที่ผสมทรายตั้งแต่ออกจากแม่พิมพ์ที่ยัด เมื่ออบแห้งชิ้นงานที่ผสมเถ้าลอยจึงหดตัวน้อยกว่า เนื่องจากอัดแน่นตัวมากกว่าชิ้นงานที่ผสมทราย

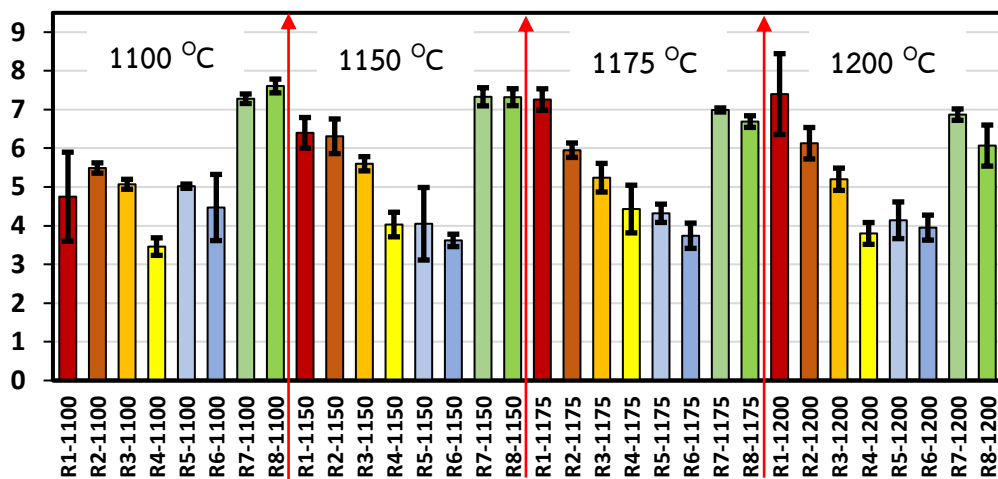
ในกรณีของชิ้นงานดินดำปราจีนบุรีที่เกิดการ Springback หากปริมาณเถ้าเพิ่มขึ้น ชิ้นงานจะมีแนวโน้มขยายตัวมากขึ้นนั้น แท้จริงแล้วปรากฏการณ์ดังกล่าวเกิดขึ้นตั้งแต่การนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ที่ยัด เนื่องด้วยขนาดอนุภาคของเถ้าหนักใหญ่กว่าเถ้าลอยและหินผุ เมื่อถูกอัดจึงตีกระจายออกได้ดีกว่าชิ้นงานที่ผสมหินผุ

4.2.2 การหดตัวหลังเผา (Firing Shrinkage)

- ชีงงานดินเหนียวราชบุรี

ค่าหดตัวหลังเผาของชีงงานดินเหนียวราชบุรีแสดงใน **รูปที่ 4.15** หลังผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1100, 1150, 1175 และ 1200 °C ชีงงานดินเหนียวราชบุรีที่ผสมเถ้าหนัก (R5 และ R6) จะหดตัวลดลงเมื่อเทียบกับชีงงานสูตรอ้างอิงที่ผสมทรายแม่น้ำ 10 wt% (R3) โดยการผสม 10 และ 20 wt% ชีงงานจะหดตัวลดลงไม่แตกต่างกันมาก ในส่วนของชีงงานที่ผสมเถ้าลอย 10 และ 20 wt% เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 1100, 1150, 1175 และ 1200 °C ชีงงานจะหดตัวมากกว่าชีงงานสูตรอ้างอิงและชีงงานที่ผสมเถ้าหนัก คาดว่าเกิดจากที่เถ้าลอยมีขนาดอนุภาคเล็กกว่าทรายแม่น้ำ ทำให้พื้นที่ผิวมากกว่า เมื่อเผาแล้วความร้อนจะกระจายตัวดีและเกิดปรากฏการณ์ Vitrification หรือการหลอมเป็นแก้วได้ดีกว่า ปรากฏการณ์ดังกล่าวส่งผลให้ส่วนที่หลอมเป็นแก้วเคลื่อนที่เข้าไปแทรกกรุพูนในชีงงานได้ดี ทำให้ชีงงานหดตัวมากขึ้น

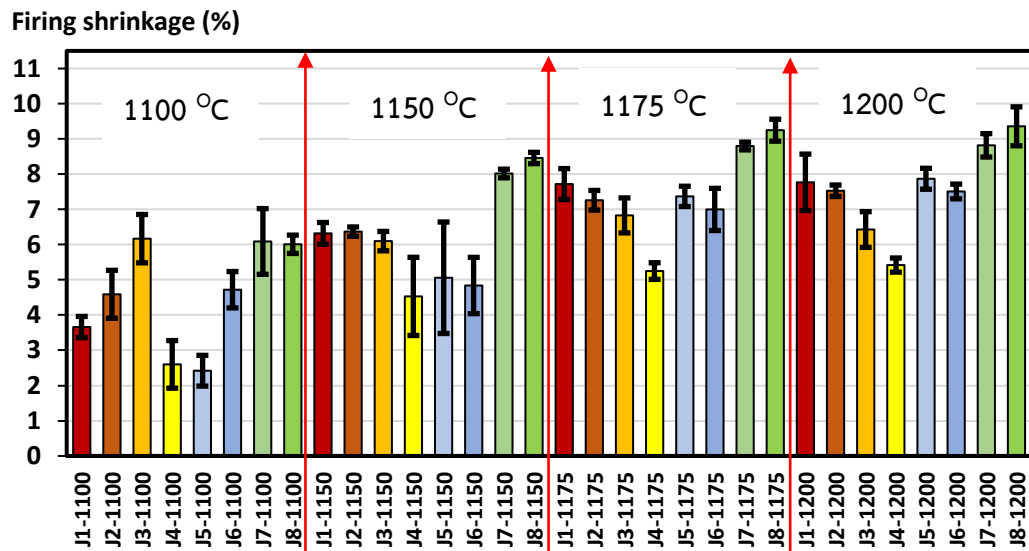
Firing Shrinkage (%)



รูปที่ 4.15 ค่าการหดตัวหลังเผาของชีงงานดินเหนียวราชบุรี

- ชีงงานดินเหนียวจันทบุรี

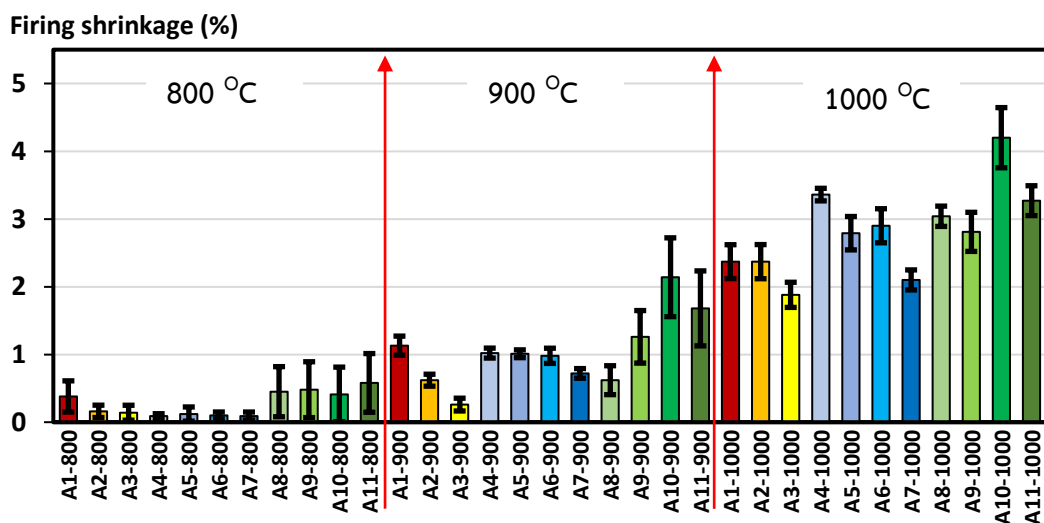
ค่าหดตัวหลังเผาของชีงงานดินเหนียวจันทบุรีแสดงใน **รูปที่ 4.16** ชีงงานที่ผสมเถ้าหนัก 10 และ 20 wt% (J5 และ J6) จะหดตัวใกล้เคียงกับชีงงานสูตรอ้างอิงที่ผสมทรายแม่น้ำ 10 wt% (J3) ในขณะที่เมื่อผสมเถ้าลอย 10 และ 20 wt% (J7 และ J8) ชีงงานจะหดตัวมากกว่าชีงงานสูตรอ้างอิงเล็กน้อย อันเนื่องมาจากขนาดอนุภาคของเถ้าลอยที่เล็ก ทำให้เกิดปรากฏการณ์หลอมเป็นแก้วได้ดี ส่วนที่หลอมเป็นแก้วเข้าไปแทรกภายในรูพูนของชีงงาน ชีงงานจึงหดตัวมากกว่า



รูปที่ 4.16 ค่าการหดตัวหลังเผาของชิ้นงานดินเหนียวจันทบุรี

- ชิ้นงานดินเหนียวอ่างทอง

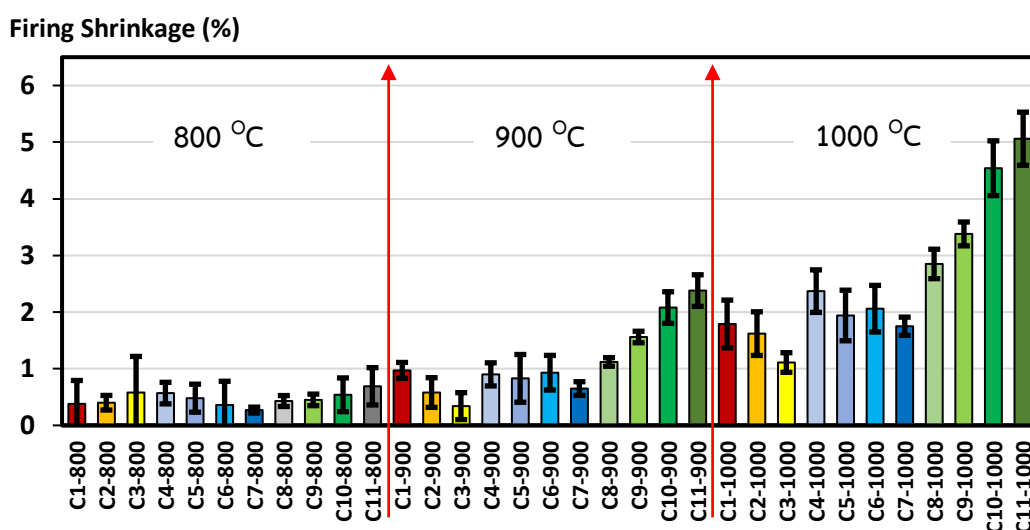
ค่าหดตัวหลังเผาของชิ้นงานดินเหนียวอ่างทองแสดงใน รูปที่ 4.17 เมื่อผสมเถ้าหนักและเผาที่อุณหภูมิ 800, 900 และ 1000 °C ชิ้นงานจะหดตัวเพิ่มขึ้น หากปริมาณของเถ้าหนักเพิ่มขึ้น ตั้งแต่ 10-40 wt%. (A4-A7) ค่าการหดตัวของชิ้นงานมีแนวโน้มลดลงจนมีค่าใกล้เคียงกับชิ้นงานสูตรมาตรฐานซึ่งผสมทรายแม่น้ำ 10 wt% (A2) การผสมเถ้าลอยจะให้ผลในทิศทางเดียวกัน เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 1000 °C ชิ้นงานจะหดตัวมากกว่าชิ้นงานสูตรมาตรฐานประมาณ 1%



รูปที่ 4.17 ค่าการหดตัวหลังเผาของชิ้นงานดินเหนียวอ่างทอง

- ชั้นงานดินเหนียวชลบุรี

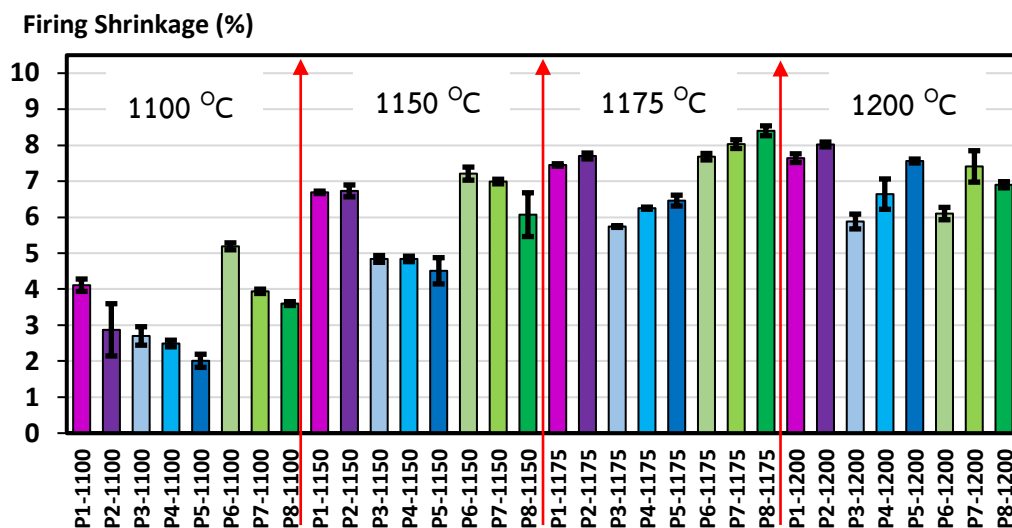
ค่าหดตัวหลังเผาของชั้นงานดินเหนียวชลบุรีแสดงใน **รูปที่ 4.18** เมื่อผสมเถ้าหนัก 10,20,30 และ 40 wt% (C4,C5,C6 และ C7) เเผาที่อุณหภูมิ 800, 900 และ 1000 °C ชั้นงานมีแนวโน้มหดตัวลดลงประมาณ 0.5-1% และมีค่าใกล้เคียงกับชั้นงานสูตรอ้างอิงที่ผสมทรายแม่น้ำ 10 wt% (C2) แต่เมื่อผสมเถ้าลอย 10, 20, 30 และ 40 wt% (C8, C9, C10 และ C11) เเผาในช่วงอุณหภูมิเดียวกัน พบว่าชั้นงานมีแนวโน้มหดตัวเพิ่มขึ้น โดยหดตัวมากกว่าสูตรอ้างอิง 1-3 %



รูปที่ 4.18 ค่าการหดตัวหลังเผาของชั้นงานดินเหนียวชลบุรี

- ชั้นงานดินดำปราจีนบุรี

ค่าหดตัวหลังเผาของชั้นงานดินดำปราจีนบุรีแสดงใน **รูปที่ 4.19** เมื่อผสมเถ้าหนัก 10-30 wt% (P3-P5) เเผาที่อุณหภูมิ 1100 และ 1150 °C ชั้นงานมีแนวโน้มหดตัวลดลงเมื่อปริมาณเถ้าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 1175 และ 1200 °C ชั้นงานมีแนวโน้มหดตัวเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเถ้าหนักเพิ่ม อย่างไรก็ตามค่าการหดตัวยังคงน้อยกว่าชั้นงานสูตรมาตรฐานที่ผสมหินผุ 50 wt% (P1) การผสมเถ้าลอยจะมีผลแนวโน้มเหมือนเถ้าหนัก แต่ค่าการหดตัวของชั้นงานจะสูงกว่าเถ้าหนักและมากกว่าชั้นงานสูตรมาตรฐาน



รูปที่ 4.19 ค่าการหดตัวหลังเผาของชิ้นงานดินดำปราจีนบุรี

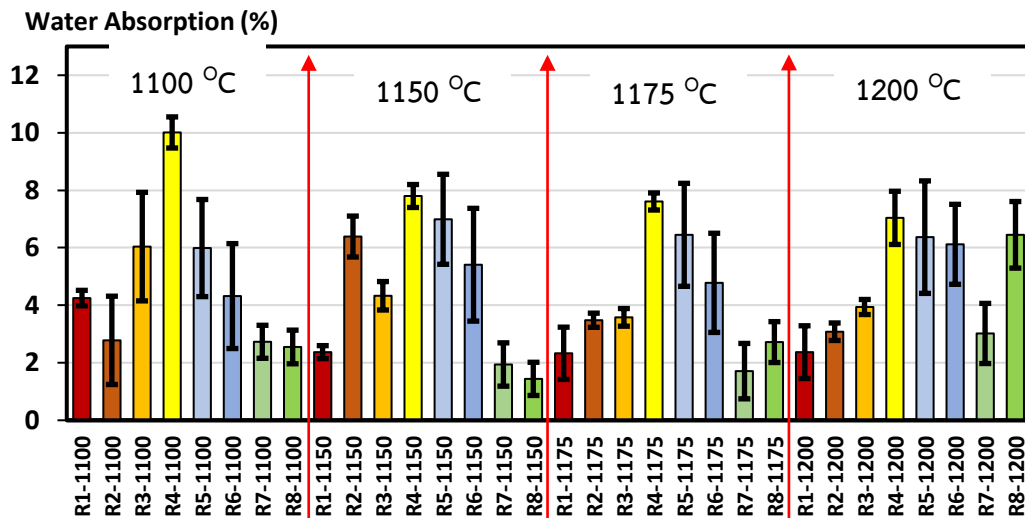
4.2.3 ค่าการดูดซึมน้ำ (Water Absorption)

- ชิ้นงานดินเหนียวราชบุรี

ค่าการดูดซึมน้ำของชิ้นงานดินเหนียวราชบุรีแสดงใน รูปที่ 4.20 ชิ้นงานที่ผสมเถ้าหนัก 10 และ 20 wt% (R5 และ R6) เเผาที่อุณหภูมิ 1100 และ 1150 °C จะดูดซึมน้ำใกล้เคียงชิ้นงานสูตรอ้างอิง (R3) เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 1175 และ 1200 °C ชิ้นงานผสมเถ้าหนักจะดูดซึมน้ำมากกว่าชิ้นงานสูตรอ้างอิงเล็กน้อย (ประมาณ 2 %) ในขณะที่การผสมเถ้าลอย 10 และ 20 wt% (R7 และ R8) เเผาที่อุณหภูมิ 1100, 1150, 1175 และ 1200 °C ชิ้นงานจะดูดซึมน้ำต่ำกว่าสูตรอ้างอิง ทว่าการผสมเถ้าลอย 20 wt% ยังพบปัญหาเมื่อเผาที่อุณหภูมิ 1200 °C ชิ้นงานมีการพองตัว รูปที่ 4.21 ซึ่งเมื่อทำการทุบชิ้นงานเพื่อศึกษาดูด้านในพบว่าชิ้นงานเกิดแกนสีดำ หรือ Black core รูปที่ 4.22

ปรากฏการณ์ดังกล่าวมาจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) ไม่สมบูรณ์ เนื่องจากขณะเผา ผิวของชิ้นงานสุกตัวเร็วเกินไปโดยที่สารอินทรีย์ภายในยังไม่ถูกเผาไหม้จนหมด เมื่อผิวแข็งตัวจนออกซิเจนจากภายนอกไม่สามารถเข้ามาได้ ความร้อนจากการเผาจึงทำให้เฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) แยกตัวออกเป็นเฟอร์ร็อกไซด์ (FeO) กับแก๊สออกซิเจน (O_2) และใช้แก๊สออกซิเจนดังกล่าวในการเผาไหม้ต่อ อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวไม่สามารถเปลี่ยนเฟอร์ริกออกไซด์ทั้งหมดให้กลายเป็นเฟอร์ร็อกไซด์ได้ จึงเกิดเป็นไอรอน (II,III) ออกไซด์ (Fe_3O_4) หรือเป็นแร่แมกนีไทต์แทน เมื่อเผาไหม้ในระบบปิด จะยังคงเกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ขึ้นในระบบ แก๊สพยายามจะดันตัวออกไปสู่ภายนอกพยายามดันออกทางผิวจึงเกิดเป็นลักษณะพองตัวขึ้นบนผิว ส่วนเนื้อในสีดำอยู่ภายในชิ้นงานคือสารอินทรีย์และองค์ประกอบอื่นที่ยังเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ดังนั้นหากต้องการผสมเถ้าลอยไม่ควรผสมเกินกว่า 20 wt% และเผาที่อุณหภูมิต่ำกว่า 1200 °C จึงจะเลี่ยงโอกาสเสี่ยงที่จะเกิด

Black core ได้ หรืออาจจะแก้ปัญหาดังกล่าวด้วยการลดอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิขณะเผา (Heating rate) เพื่อให้ชิ้นงานที่ผิวไม่สุกตัวเร็วเกินไป



รูปที่ 4.20 ค่าการดูดซึมน้ำของชิ้นงานดินเหนียวราชบุรี



รูปที่ 4.21 ลักษณะชิ้นงานที่มีการฟองตัวที่ผิว



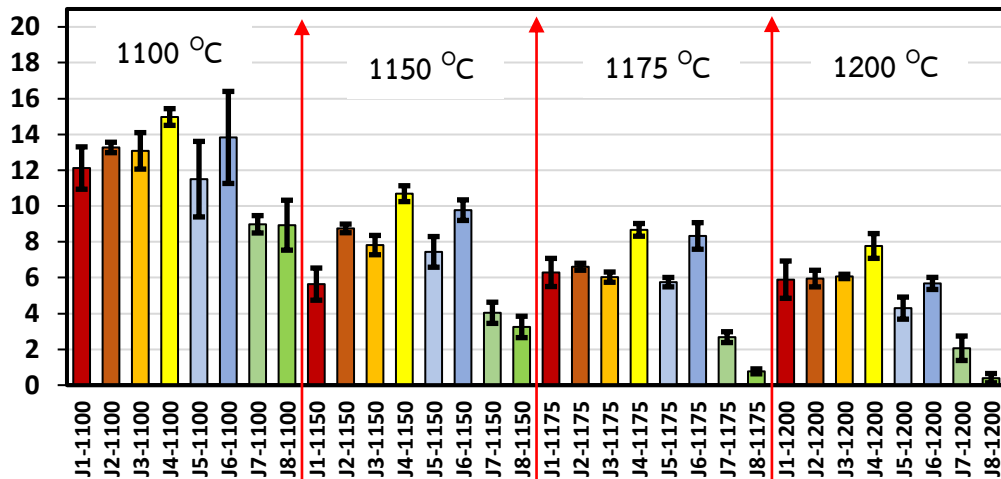
รูปที่ 4.22 ชิ้นงานดินเหนียวราชบุรีผสมเถ้าลอย 20 wt% เผาที่อุณหภูมิ 1200 °C เกิดแกนสีดำ

- ชิ้นงานดินเหนียวจันทบุรี

ชิ้นงานดินเหนียวจันทบุรีผสมเถ้าลอยและเถ้าหนักแสดงใน รูปที่ 4.23 ให้ผลที่สอดคล้องกับผลของดินเหนียวราชบุรี การผสมเถ้าลอย 10 และ 20 wt% จะมีค่าการดูดซึมน้ำต่ำกว่าสูตรอ้างอิง (J3) และการผสมเถ้าหนักจะทำให้ชิ้นงานดูดซึมน้ำได้มากกว่า ทั้งนี้พบว่าการเผาที่อุณหภูมิ 1100 °C ค่าการดูดซึมน้ำจะสูงกว่าการเผาที่อุณหภูมิอื่นมากกว่าพอสมควร ซึ่งคาดว่าชิ้นงานยังไม่สุกตัว เมื่อเทียบกับค่ามาตรฐานตาม มพช.46/2556 พบว่าชิ้นงานที่ผสมเถ้าหนัก 10 wt% และผสมเถ้าลอย 10 หรือ 20 wt% เผาที่อุณหภูมิ 1150, 1175 และ 1200 °C รวมไปถึงชิ้นงานผสมเถ้าหนัก 20 wt% เผาที่อุณหภูมิ 1175 และ 1200 °C จะผ่านเกณฑ์ดังกล่าว สามารถสรุปได้เบื้องต้นว่า หาก

ต้องการผสมเข้าหนักควรผสมไม่เกิน 20 wt% และควรเผาที่อุณหภูมิสูงกว่า 1175 °C หากใช้แก้วลอย
ควรเผาที่อุณหภูมิสูงกว่า 1100 °C ค่าการดูดซึมน้ำจึงจะอยู่เกณฑ์มาตรฐาน

Water Absorption (%)



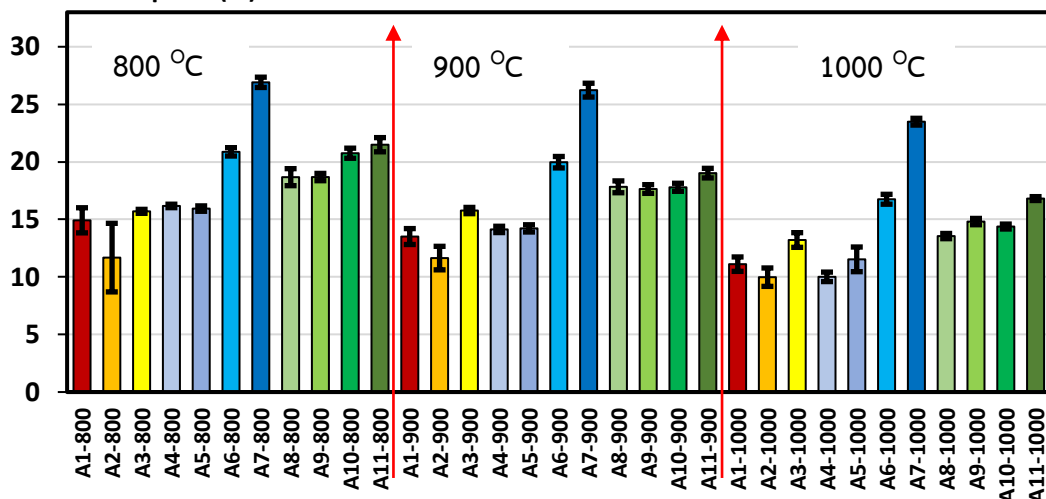
รูปที่ 4.23 ค่าการดูดซึมน้ำของชิ้นงานดินเหนียวจันทบุรี

- ชิ้นงานดินเหนียวอ่างทอง

ค่าการดูดซึมน้ำของชิ้นงานดินเหนียวอ่างทองเผาที่อุณหภูมิ 800, 900 และ 1000 °C แสดงใน รูปที่ 4.24 เมื่อผสมเข้าหนัก 10, 20, 30 และ 40 wt% (A4, A5, A6 และ A7 ตามลำดับ) ชิ้นงานจะดูดซึมน้ำได้มากขึ้นเมื่อเทียบกับสูตรอ้างอิงซึ่งผสมทรายแม่น้ำ 10 wt% (A2) สัดส่วนของปริมาณแก้วเพิ่มขึ้น ชิ้นงานยังดูดซึมน้ำได้มากขึ้น ในขณะที่การผสมแก้วลอยจะทำให้ชิ้นงานดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับสูตรอ้างอิงเช่นเดียวกัน แต่ค่าการดูดซึมน้ำจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อปริมาณแก้วลอยสูงขึ้น

จฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Water Absorption (%)

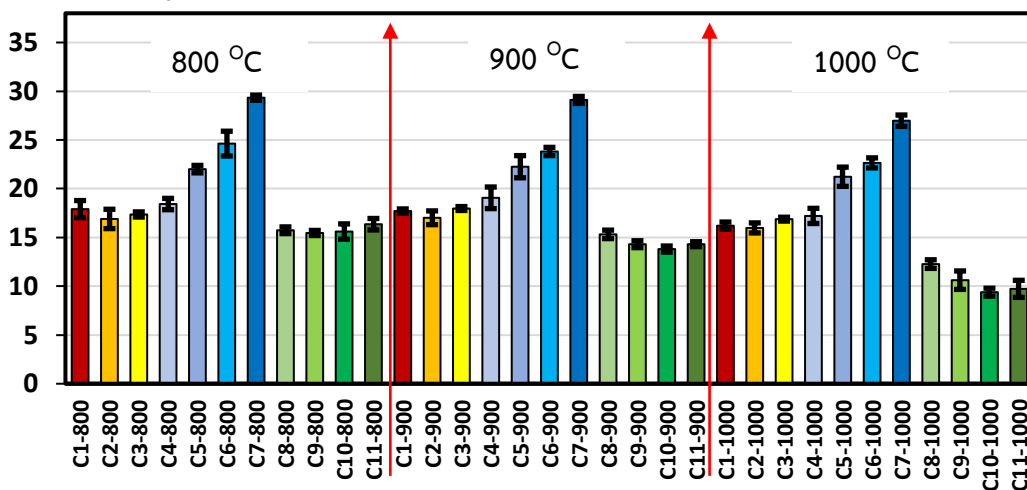


รูปที่ 4.24 ค่าการดูดซึมน้ำของชิ้นงานดินเหนียวอ่างทอง

- ชั้นงานดินเหนียวชลบุรี

ค่าการดูดซึมน้ำของชั้นงานดินเหนียวชลบุรีเผาที่อุณหภูมิ 800, 900 และ 1000 °C แสดงใน **รูปที่ 4.25** ชั้นงานดินเหนียวชลบุรีเมื่อผสมเถ้าหนัก 10 และ 20 wt% (C4 และ C5) หลังผ่านการเผา จะมีค่าการดูดซึมน้ำใกล้เคียงกับชั้นงานสูตรอ้างอิงที่ผสมทรายแม่น้ำ 10 wt% (C2) และอยู่ในเกณฑ์ชั้นคุณภาพ ก ตามมอก.77-2545 อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มสัดส่วนของเถ้าหนักเป็น 30 และ 40 wt% (C6 และ C7) ค่าการดูดซึมน้ำมีแนวโน้มสูงขึ้นซึ่งคาดว่าเกิดจากเถ้าหนักมีขนาดใหญ่ และมีโครงสร้างผลึกหลายชนิดที่จุดหลอมเหลวสูง อาทิ ควอตซ์ อะนอร์ไทต์ และแมกนีไทต์ เกิดเฟสของเหลวน้อยลงขณะเผา เมื่อเฟสของเหลวน้อยลงรูพรุนจึงไม่ถูกอุด ทำให้ชั้นงานดูดซึมน้ำได้มากขึ้น หากใช้เถ้าหนักไม่ควรผสมเกินกว่า 20 wt% เพราะค่าการดูดซึมน้ำจะสูงเกินมาตรฐาน แต่เมื่อผสมเถ้าลอย 10, 20, 30 และ 40 wt% (C8, C9, C10 และ C11) ค่าการดูดซึมน้ำจะต่ำกว่าชั้นงานสูตรอ้างอิง คาดว่าเกิดจากขนาดอนุภาคเถ้าลอยเล็กกว่าทรายและเถ้าหนัก ทำให้มีพื้นที่ผิวมาก รับความร้อนได้ดีและเกิดการหลอมเป็นแก้วได้ดีกว่า บางส่วนที่หลอมเป็นของเหลวแก้วจะเข้าไปอุดรูพรุนในชั้นงาน เมื่อรูพรุนลดลง ชั้นงานจึงดูดซึมน้ำลดลง การเผาที่อุณหภูมิ 1000 °C เมื่อปริมาณเถ้าเพิ่มขึ้นแนวโน้มค่าการดูดซึมน้ำจะลดลง สอดคล้องกับงานวิจัยของ C. Leiva และคณะ [33] ซึ่งนำดินมาผสมกับเถ้าลอยในสัดส่วน 100:0, 80:20, 60:40, 40:60, 20:80 และ 100:80 ขึ้นรูปเป็นชั้นงานแท่งกลม โดยงานวิจัยนี้เมื่อทำการเผาชั้นงานที่อุณหภูมิ 800, 900 และ 1000 °C พบว่าหากเผาที่อุณหภูมิ 800 และ 900 °C สัดส่วนเถ้าลอยเพิ่มขึ้นค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น แต่ถ้าเผาที่อุณหภูมิ 1000 °C ชั้นงานจะเริ่มแน่นตัว สัดส่วนเถ้าลอยเพิ่มขึ้น ค่าการดูดซึมน้ำแนวโน้มลดลง

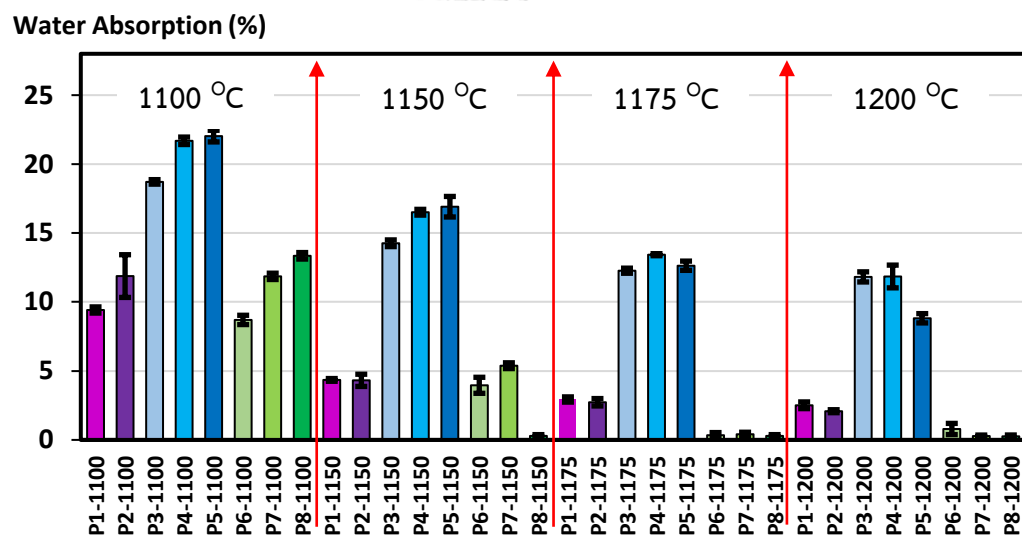
Water Absorption (%)



รูปที่ 4.25 ค่าการดูดซึมน้ำของชั้นงานดินเหนียวชลบุรี

- ชิ้นงานดินดำปราจีนบุรี

ค่าการดูดซึมน้ำของชิ้นงานดินดำปราจีนบุรี รูปที่ 4.26 ชิ้นงานที่ผสมเถ้าหนัก 40, 50 และ 60 wt% (P3, P4 และ P5) เเผาที่อุณหภูมิ 1100, 1150, 1175 และ 1200 °C ค่าการดูดซึมน้ำจะสูงกว่าชิ้นงานอ้างอิงที่ผสมหินผุ 50 wt% (P1) อย่างเห็นได้ชัด คาดว่าการเผาที่อุณหภูมิตั้งกล่าว เถ้าหนักยังเกิดการหลอมเป็นแก้วได้ไม่เต็มที่ เมื่อผสมเถ้าลอยและเผาที่อุณหภูมิสูงกว่า 1100 และ 1150 °C ค่าการดูดซึมน้ำของชิ้นงานจะใกล้เคียงกับชิ้นงานสูตรอ้างอิง แต่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 1175 และ 1200 °C ชิ้นงานจะดูดซึมน้ำน้อยกว่า 0.5 % คาดว่าเกิดจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้การหลอมเป็นแก้วเกิดได้ตีมากขึ้น



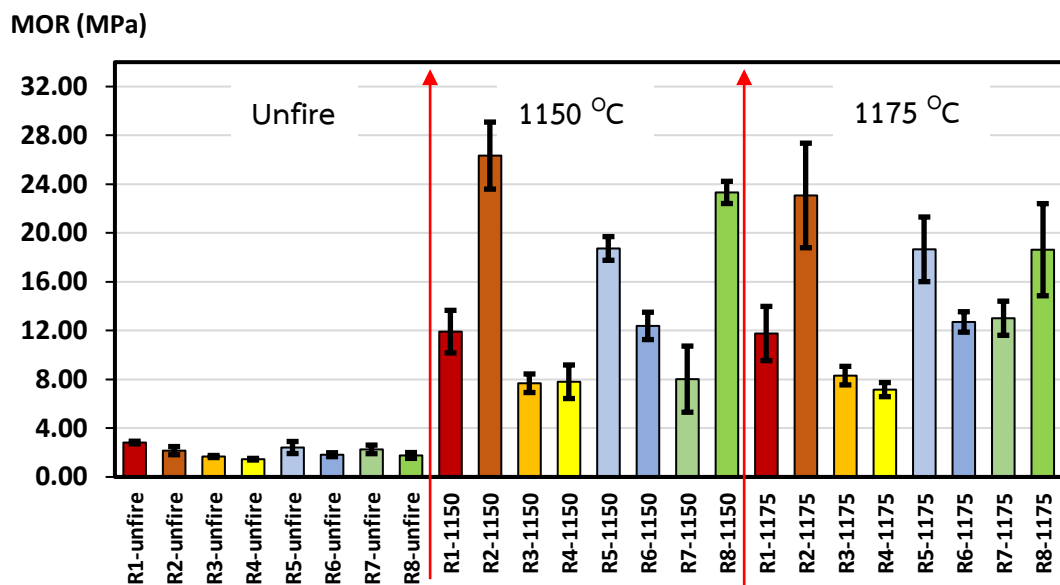
รูปที่ 4.26 ค่าการดูดซึมน้ำของชิ้นงานดินดำปราจีนบุรี

ผลจากการวิเคราะห์ค่าการดูดซึมน้ำของชิ้นงานดินเหนียวราชบุรี จันทบุรี อ่างทองและชลบุรี รูปที่ 4.20, รูปที่ 4.23, รูปที่ 4.24 และ รูปที่ 4.25 ตามลำดับ พบว่าให้ผลสอดคล้องกับค่าการหดตัวหลังเผาของชิ้นงาน รูปที่ 4.15, รูปที่ 4.16, รูปที่ 4.17 และ รูปที่ 4.18 ตามลำดับ กล่าวคือค่าการหดตัวหลังเผาของชิ้นงานมากขึ้นเมื่อผสมเถ้าลอย ส่งผลทำให้ชิ้นงานแน่นตัว เมื่อชิ้นงานแน่นตัว ปริมาตรรูพรุนลดลง จึงทำให้ชิ้นงานดูดซึมน้ำได้น้อยลง ในส่วนของชิ้นงานดินดำปราจีนบุรี รูปที่ 4.26 แม้ค่าการหดตัวเมื่อผสมเถ้าหนักและเถ้าลอยจะใกล้เคียงกัน แต่ค่าการดูดซึมน้ำมีความแตกต่างกัน เนื่องจากขนาดอนุภาคของเถ้าหนักใหญ่กว่าเถ้าลอย พื้นที่ผิวน้อยกว่า ทำให้การเกิดเป็นแก้วของเถ้าหนักเกิดได้ไม่ดีเหมือนเถ้าลอย ชิ้นงานหลอมเป็นแก้วได้น้อย รูพรุนมาก ค่าการดูดซึมน้ำจึงมากขึ้นเช่นกัน

4.2.4 ค่าโมดูลัสแตกร้าว (Modulus of Rupture)

- ชั้นงานดินเหนียวราชบุรี

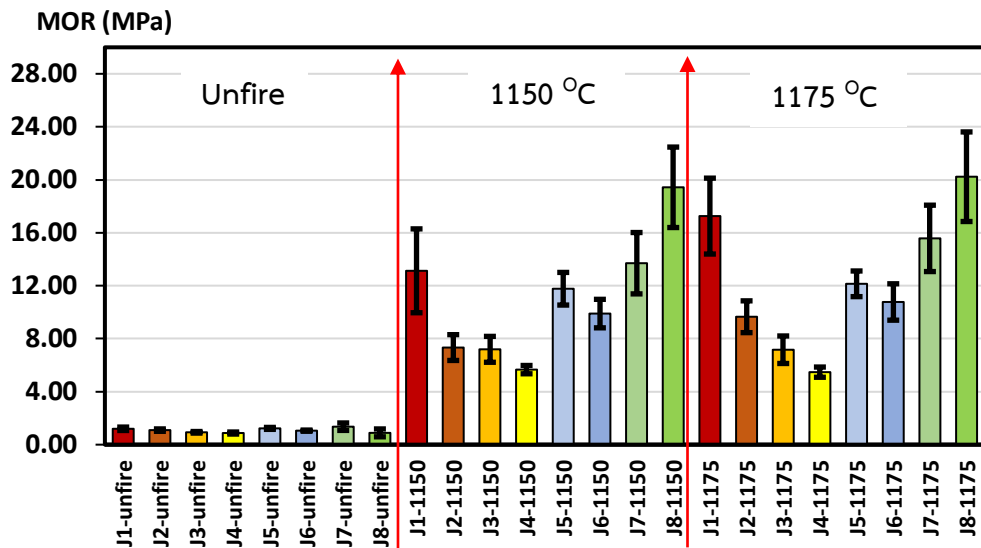
ค่าโมดูลัสแตกร้าวของชั้นงานดินเหนียวราชบุรีแสดงใน **รูปที่ 4.27** เมื่อผสมเถ้าหนัก 10 wt% (R5) เเผาที่อุณหภูมิ 1150 และ 1175 °C ชั้นงานจะแข็งแกร่งกว่าชั้นงานสูตรอ้างอิง (R3) เมื่อปริมาณเถ้าหนักเพิ่มขึ้นเป็น 20 wt% ค่าความแข็งแรงจะลดลง ในขณะที่การผสมเถ้าลอยชั้นงานจะแข็งแกร่งกว่าสูตรอ้างอิงเช่นกัน แต่หากปริมาณเพิ่มขึ้นเป็น 20 wt% ความแข็งแรงจะเพิ่มขึ้น ทั้งนี้คาดว่าเกิดจากในเถ้าทั้งสองชนิดมีผลึกมุลไลต์ซึ่งประกอบด้วยซิลิกาและอะลูมินา จึงมีการจัดเรียงโครงสร้างที่แข็งแรงกว่าควอตซ์ในทราย



รูปที่ 4.27 ค่าโมดูลัสแตกร้าวของชั้นงานดินเหนียวราชบุรี

- ชั้นงานดินเหนียวจันทบุรี

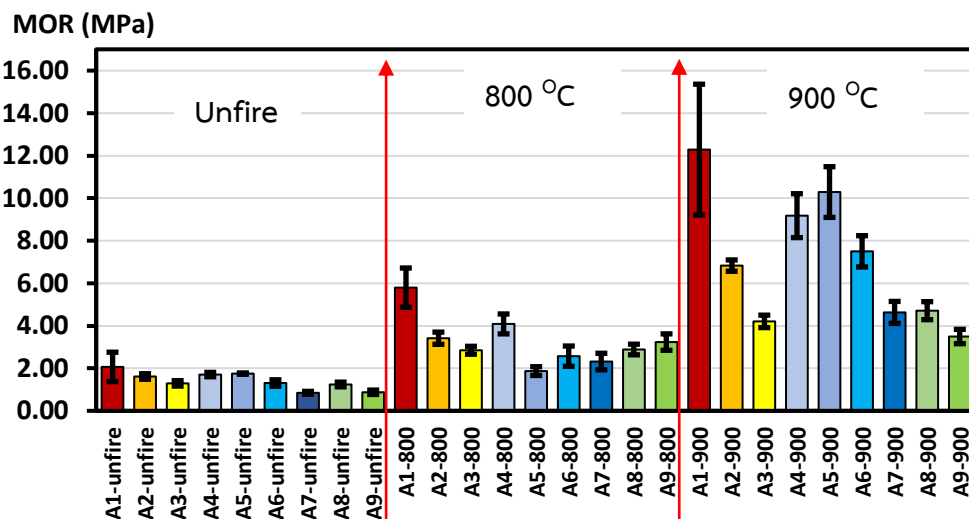
ค่าโมดูลัสแตกร้าวของชั้นงานดินเหนียวจันทบุรีแสดงใน **รูปที่ 4.28** ชั้นงานดินเหนียวจันทบุรีจะมีแนวโน้มค่าความแข็งแรงคล้ายกับดินเหนียวราชบุรีกล่าวคือ เมื่อผสมเถ้าหนักหรือเถ้าลอย 10 wt% (J5) เเผาที่อุณหภูมิ 1150 และ 1175 °C ชั้นงานจะมีค่าความแข็งแรงสูงกว่าชั้นงานสูตรอ้างอิง (J3) หากปริมาณเถ้าหนักเพิ่มขึ้นเป็น 20 wt% ค่าความแข็งแรงจะลดลงเล็กน้อย ส่วนปริมาณเถ้าลอยเพิ่มขึ้นเป็น 20 wt% ค่าความแข็งแรงจะเพิ่มขึ้นเป็น 20 wt%



รูปที่ 4.28 ค่าโมดูลัสแตกหักของชิ้นงานดินเหนียวจันทบุรี

- ชิ้นงานดินเหนียวอ่างทอง

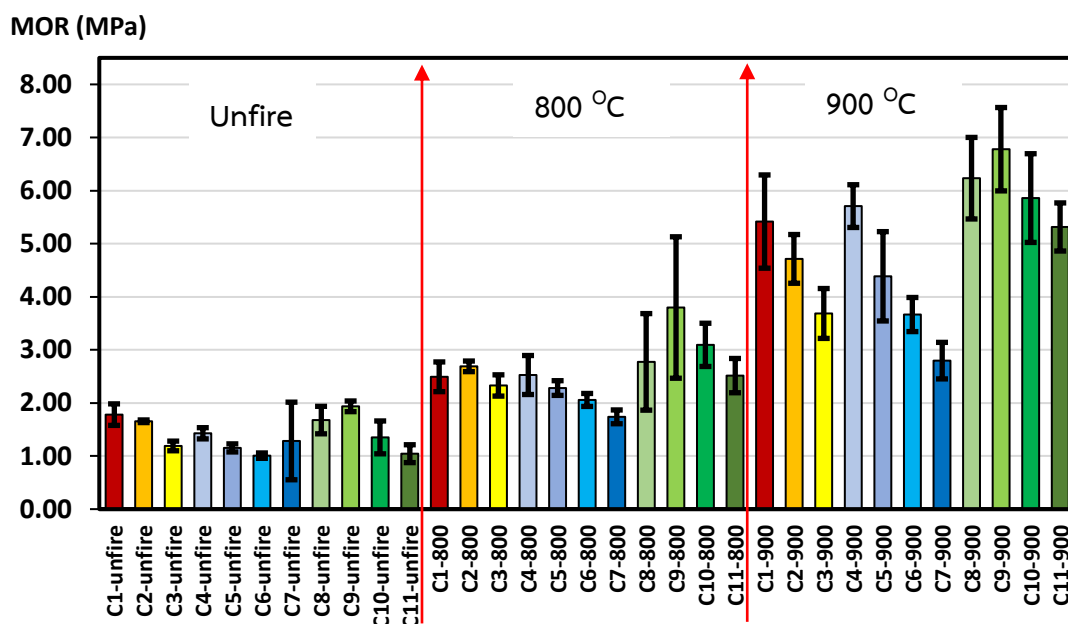
ค่าโมดูลัสแตกหักของชิ้นงานดินเหนียวอ่างทองแสดงใน **รูปที่ 4.29** เมื่อผสมเถ้าหนัก 10 wt% และเผาที่อุณหภูมิ 900 °C ชิ้นงานจะแข็งแรงกว่าสูตรอ้างอิงซึ่งผสมทรายแม่น้ำ 10 wt% (A2) หากปริมาณเถ้าหนักเพิ่มขึ้นเป็น 20 wt% ค่าความแข็งแรงจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่เมื่อปริมาณเถ้าหนักเพิ่มเป็น 30 และ 40 wt% ค่าความแข็งแรงจะเริ่มลดลง เมื่อผสมเถ้าลอย ค่าความแข็งแรงชิ้นงานจะมีค่าใกล้เคียงกับชิ้นงานอ้างอิง แต่จะน้อยกว่าชิ้นงานที่ผสมเถ้าหนัก หากผสมเถ้าลอย 20 wt% ความแข็งแรงจะมีค่าใกล้เคียงกับสูตรอ้างอิง แต่เมื่อผสม 30 และ 40 wt% พบว่าชิ้นงานมีความเหนียวน้อยเกินไป จนทำให้ไม่สามารถอัดรีดออกมาเป็นแท่งกลมได้



รูปที่ 4.29 ค่าโมดูลัสแตกหักของชิ้นงานดินเหนียวอ่างทอง

- ชีงงานดินเหนียวชลบุรี

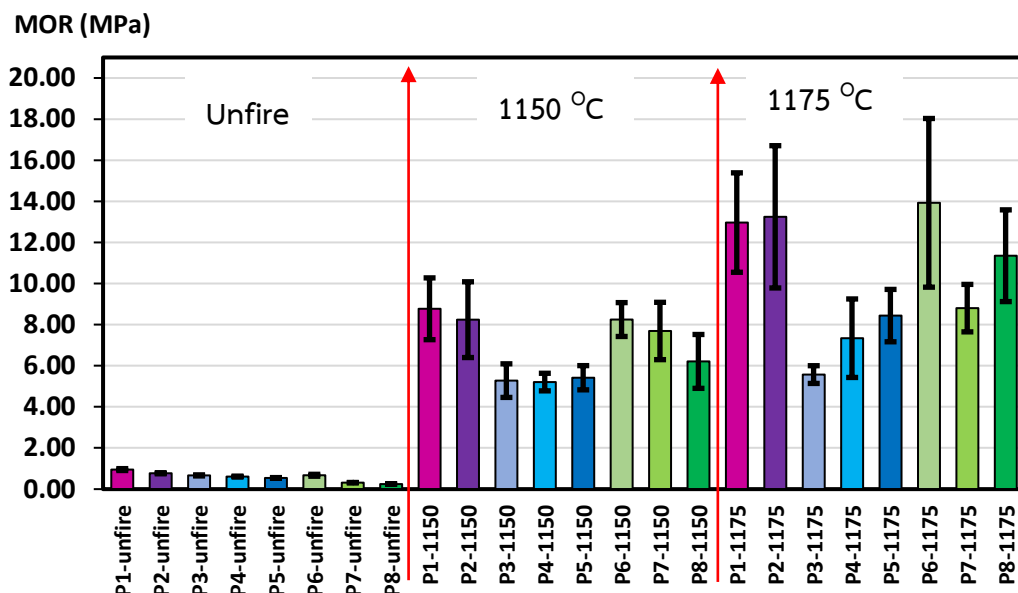
ค่าโมดูลัสแตกร้าวของชีงงานดินเหนียวชลบุรีแสดงใน **รูปที่ 4.30** ดินเหนียวชลบุรีเมื่อผสมเถ้าหนัก 10 wt% และเผาที่อุณหภูมิ 900 °C ชีงงานจะแข็งแรงกว่าสูตรอ้างอิงที่ผสมทรายแม่น้ำ 10 wt% (C2) แต่เมื่อปริมาณเถ้าหนักเพิ่มเป็น 20 30 และ 40 wt% ค่าความแข็งแรงจะลดลง เมื่อผสมเถ้าลอยเผาที่อุณหภูมิเท่ากัน ชีงงานจะมีความแข็งแรงใกล้เคียงกับชีงงานที่ผสมเถ้าหนัก เมื่อผสมเถ้าลอย 10 และ 20 wt% ค่าความแข็งแรงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่เมื่อปริมาณเถ้าหนักเพิ่มเป็น 30 และ 40 wt% ค่าความแข็งแรงเริ่มลดลง



รูปที่ 4.30 ค่าโมดูลัสแตกร้าวของชีงงานดินเหนียวชลบุรี

- ชีงงานดินดำปราจีนบุรี

ค่าโมดูลัสแตกร้าวของชีงงานดินดำปราจีนบุรี **รูปที่ 4.31** เมื่อผสมเถ้าหนัก 40-60 wt% (P3-P5) และเผาที่อุณหภูมิ 1150 และ 1175 °C ชีงงานจะมีความแข็งแรงน้อยกว่าชีงงานสูตรอ้างอิง (P1) ชีงงานมีแนวโน้มแข็งแรงขึ้นเล็กน้อยเมื่อปริมาณเถ้าหนักเพิ่มขึ้น แต่เมื่อผสมเถ้าลอย 40 wt% (P6) ค่าความแข็งแรงจะสูงที่สุด และจะลดลงเมื่อปริมาณเถ้าเพิ่มขึ้นเป็น 50 และ 60 wt% (P7 และ P8)



รูปที่ 4.31 ค่าโมดูลัสแตกร้าวของชิ้นงานดินดำปราจีนบุรี

4.3 ผลของเถ้าถ่านหินบิทุมินัสต่อลักษณะเฉพาะของเนื้อผลิตภัณฑ์เซรามิกหลังเผา

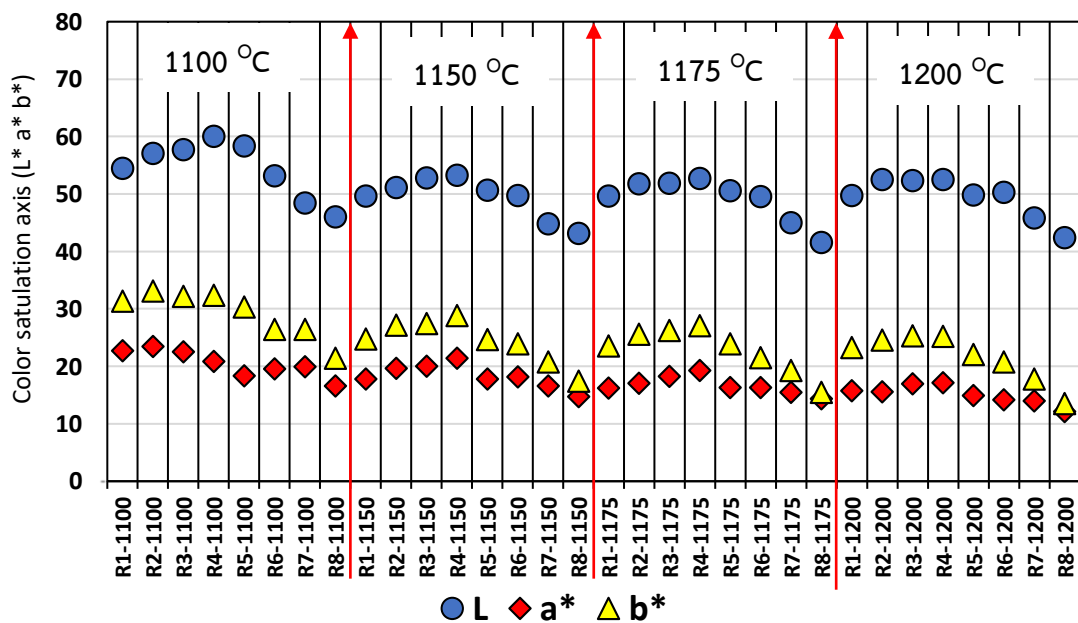
4.3.1 สีและรูปร่างภายนอกของชิ้นงาน

- ชิ้นงานดินเหนียวราชบุรี

ชิ้นงานดินเหนียวราชบุรีผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1100, 1150, 1175 และ 1200 °C แสดงใน **รูปที่ 4.32** ชิ้นงานที่ผสมเถ้าหนัก 10 และ 20 wt% (R5 และ R6) สีของชิ้นงานจะมีแนวโน้มคล้ำดำลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับชิ้นงานสูตรอ้างอิงที่ผสมทรายแม่น้ำ 10 wt% (R3) และหากผสมเถ้าลอย 10 และ 20 wt% ชิ้นงานจะคล้ำลงกว่าผสมเถ้าหนัก สังเกตได้จากค่า L^* ใน **รูปที่ 4.33** สีไม่แดงสดเท่ากับสูตรอ้างอิงซึ่งเกิดจากการที่อนุภาคของเถ้าลอยมีขนาดเล็ก เมื่อผสมไปในชิ้นงานจะทำให้เผาแล้วสุกตัวดีกว่าเถ้าหนัก เนื่องจากมีพื้นที่ผิวมากกว่า เฟอร์ริกออกไซด์ในเถ้าลอยจะเปลี่ยนแปลงเฟสไปเป็นไฮดรอกไซด์มากขึ้น ส่งผลทำให้ชิ้นงานมีสีคล้ำดำกว่าปกติ ชิ้นงานไม่มีการเปลี่ยนแปลงเม็ดสีแดง (a^*) อย่างเห็นได้ชัด อาจเป็นเพราะปริมาณเฟอร์ริกออกไซด์ในเถ้าที่ผสมเข้ามามีน้อย (ประมาณ 1-2 %) จนไม่เห็นผลอย่างชัดเจน



รูปที่ 4.32 ชิ้นงานดินเหนียวราชบุรีหลังผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1100, 1150, 1175 และ 1200 °C



รูปที่ 4.33 ผลการวิเคราะห์ค่าสีในระบบ CIELab ของชิ้นงานดินเหนียวราชบุรี

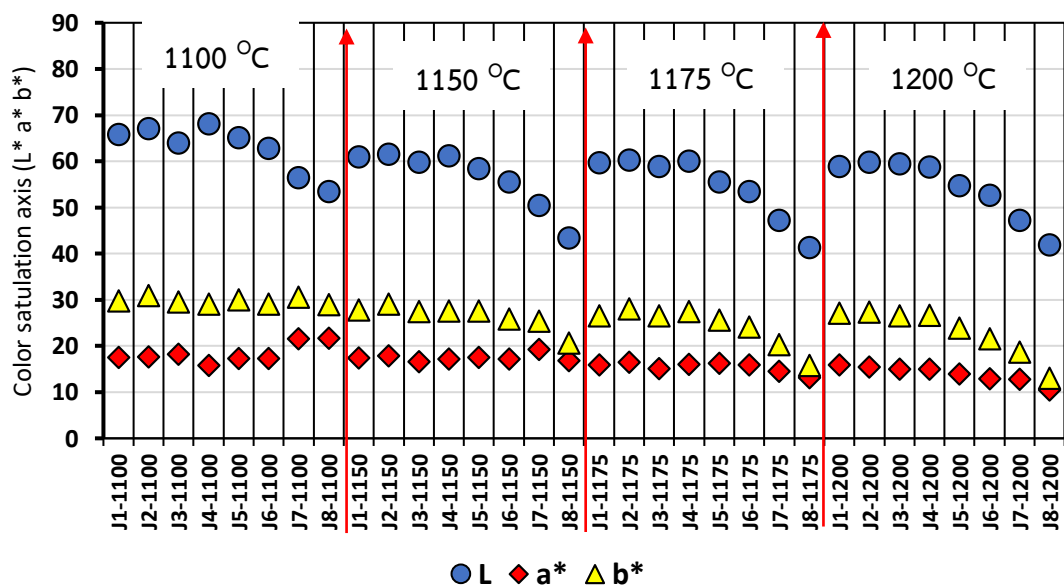
- ชิ้นงานดินเหนียวจันทบุรี

ชิ้นงานดินเหนียวจันทบุรีผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1100, 1150, 1175 และ 1200 °C แสดงใน รูปที่ 4.34 พบว่าเมื่อผสมเถ้าหนัก 10 และ 20 wt% (J5 และ 6) เผาที่อุณหภูมิทั้ง 4 อุณหภูมิ สีของชิ้นงานจะใกล้เคียงกับชิ้นงานสูตรอ้างอิงที่ผสมทรายแม่น้ำ 10 wt% (J3) และหากผสมเถ้าลอย 10 และ 20 wt% ชิ้นงานจะคล้ำลงกว่าอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งสังเกตได้จากการมองด้วยสายตา และ

ยืนยันผลจากค่า L^* ใน รูปที่ 4.35 เกิดจากการที่อุณหภูมิของถ้ำลอยมีขนาดเล็ก เมื่อผสมไปในชิ้นงาน จะทำให้เผาแล้วสุกตัวดีกว่าถ้ำหนัก เนื่องจากมีพื้นที่ผิวมากกว่า เฟอร์ริกออกไซด์ในถ้ำลอยจะเปลี่ยนแปลงเฟสไปเป็นไฮดรอกไซด์มากขึ้น ไม่พบการเปลี่ยนแปลงสีแดงของชิ้นงาน เช่นเดียวกับชิ้นงานดินเหนียวราชบุรี



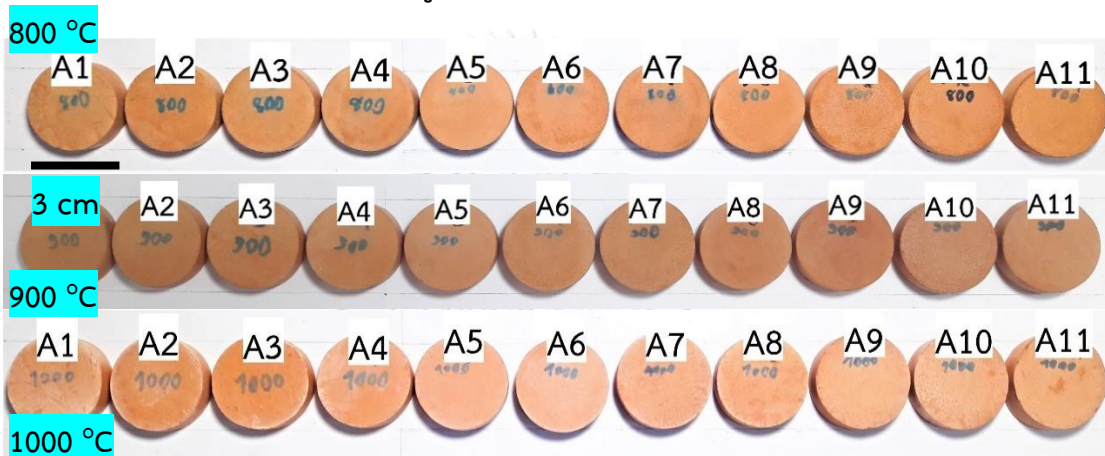
รูปที่ 4.34 ชิ้นงานดินเหนียวจันทบุรีหลังผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1100, 1150, 1175 และ 1200 °C



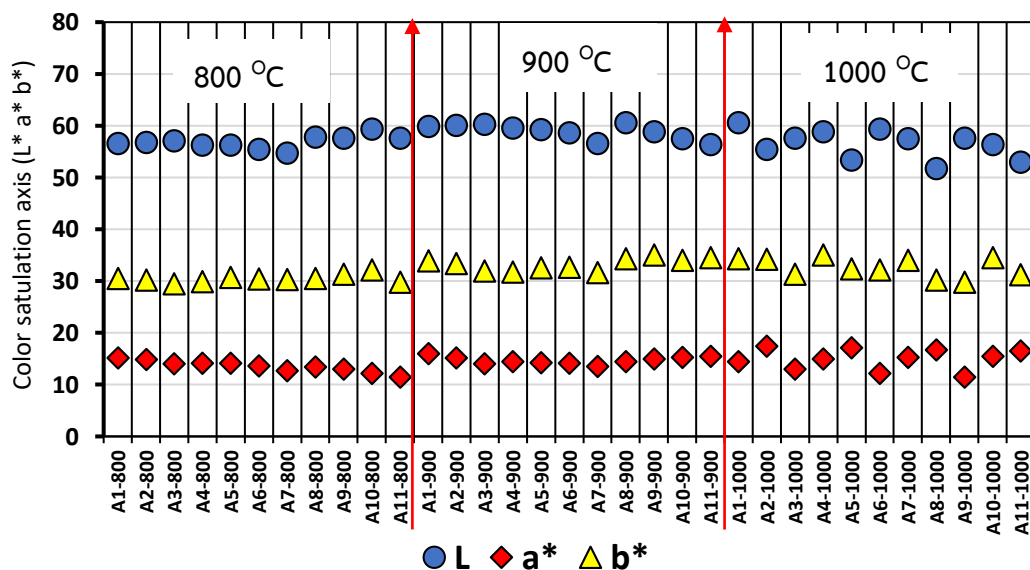
รูปที่ 4.35 ผลการวิเคราะห์ค่าสีในระบบCIE Lab ของชิ้นงานดินเหนียวจันทบุรี

- ชั้นงานดินเหนียวอ่างทอง

ชั้นงานดินเหนียวอ่างทองผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 800, 900, และ 1000 °C แสดงใน **รูปที่ 4.36** พบว่าเมื่อผสมเถ้าหนัก 10, 20, 30 และ 40 wt% (A4, A5, A6 และ A7 ตามลำดับ) และผสมเถ้าลอย 10, 20, 30 และ 40 wt% (A8, A9, A10 และ A11) เเผาที่อุณหภูมิทั้ง 3 อุณหภูมิ สีของชั้นงานใกล้เคียงกัน เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 1000 °C เกิดคราบขาว หรือ Scumming บนผิวของชั้นงาน ซึ่งเกิดจากเกลือแคลเซียมซัลเฟตที่ละลายน้ำได้ดี สารประกอบเหล่านี้จะละลายมากับน้ำแล้วขึ้นมาอยู่บริเวณผิวของชั้นงาน เมื่อน้ำระเหยไปจากการอบแห้ง จึงเหลือเป็นผลึกของสารประกอบเหล่านี้อยู่บนผิว ค่าสีของชั้นงานจะใกล้เคียงกัน **รูปที่ 4.37**



รูปที่ 4.36 ชั้นงานดินเหนียวอ่างทองหลังผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 800, 900 และ 1000 °C



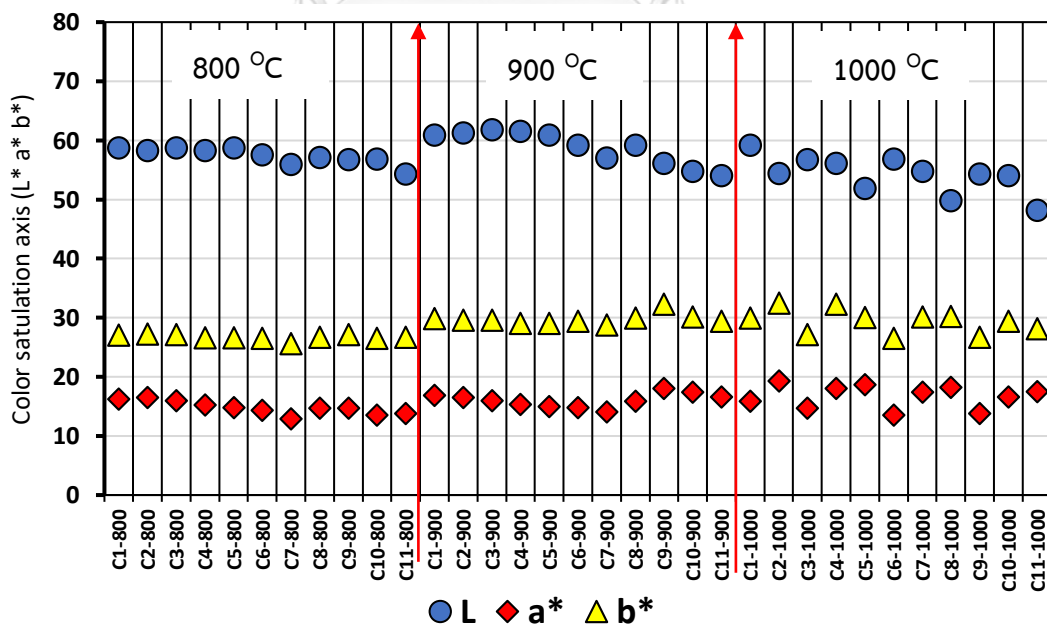
รูปที่ 4.37 ผลการวิเคราะห์ค่าสีในระบบCIELab ของชั้นงานดินเหนียวอ่างทอง

- ชี้นงานดินเหนียวชลบุรี

ชี้นงานดินเหนียวชลบุรีผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 800, 900, และ 1000 °C แสดงใน **รูปที่ 4.38** การผสมแก้วลอย 10, 20, 30 และ 40 wt% (C8, C9, C10 และ C11) ตามลำดับ เเผาที่อุณหภูมิ 800 และ 900 °C ชี้นงานจะมีสีแดงสดมากขึ้น สั้เกตจากค่า a^* ใน **รูปที่ 4.39** เกิด Scumming ลดลง และมีความคล้าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ในขณะที่ชี้นงานผสมแก้วหนัก (C4-C7) ยังคงเกิด Scumming บนผิวอยู่



รูปที่ 4.38 ชี้นงานดินเหนียวชลบุรีหลังผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 800, 900 และ 1000 °C



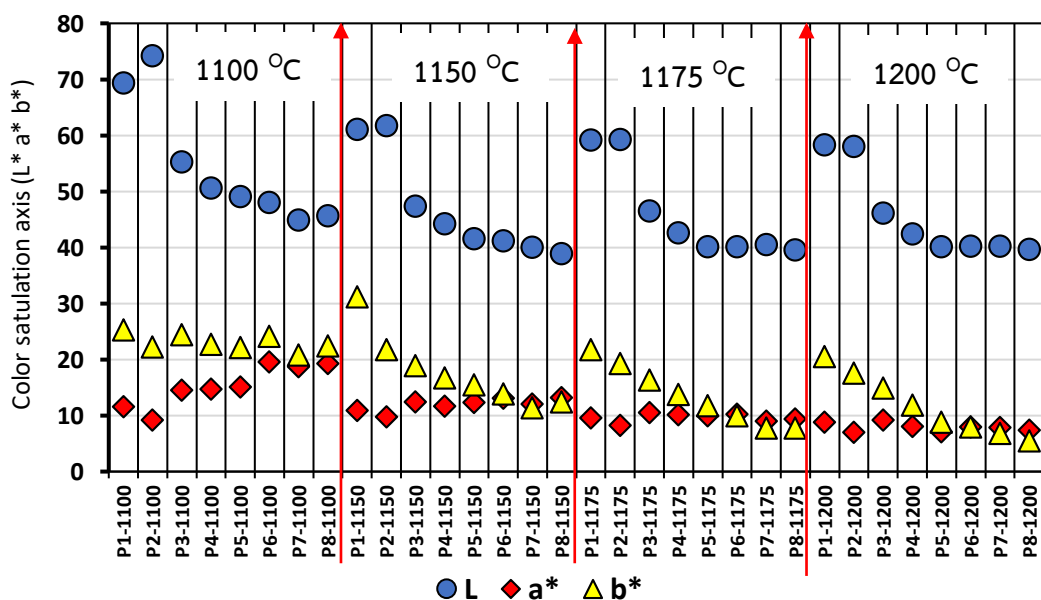
รูปที่ 4.39 ผลการวิเคราะห์ค่าสีในระบบCIELab ของชี้นงานดินเหนียวชลบุรี

- ชิ้นงานเนื้อผลิตภัณฑ์กระเบื้อง

ชิ้นงานดินดำปราจีนบุรีผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1100, 1150, 1175 และ 1200 °C แสดงในรูปที่ 4.40 เมื่อผสมเถ้าหนัก 40, 50 และ 60 wt% (P3, P4 และ P5 ตามลำดับ) และผสมเถ้าลอย 40, 50 และ 60 wt% (P6, P7 และ P8 ตามลำดับ) เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 1100 °C ชิ้นงานจะมีสีแดงสดเมื่อเทียบกับชิ้นงานสูตรอ้างอิงที่ผสมหินผุ 50 wt% (P1) แต่พอเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้นเพอริกออกไซด์เปลี่ยนรูปเป็นไอรอน (II,III) ออกไซด์ทำให้ชิ้นงานคล้ำขึ้น ค่าสีขาวย L ลดลง รูปที่ 4.41 ชิ้นงานที่ผสมเถ้าลอยจะคล้ำดำกว่าชิ้นงานที่ผสมเถ้าหนัก เนื่องจากอนุภาคของเถ้าลอยมีขนาดเล็กกว่า พื้นที่ผิวมาก ทำให้การเปลี่ยนรูปเป็นไอรอน (II,III) ออกไซด์เกิดขึ้นได้ดีกว่า



รูปที่ 4.40 ชิ้นงานดินดำปราจีนบุรีหลังผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1100, 1150, 1175 และ 1200 °C

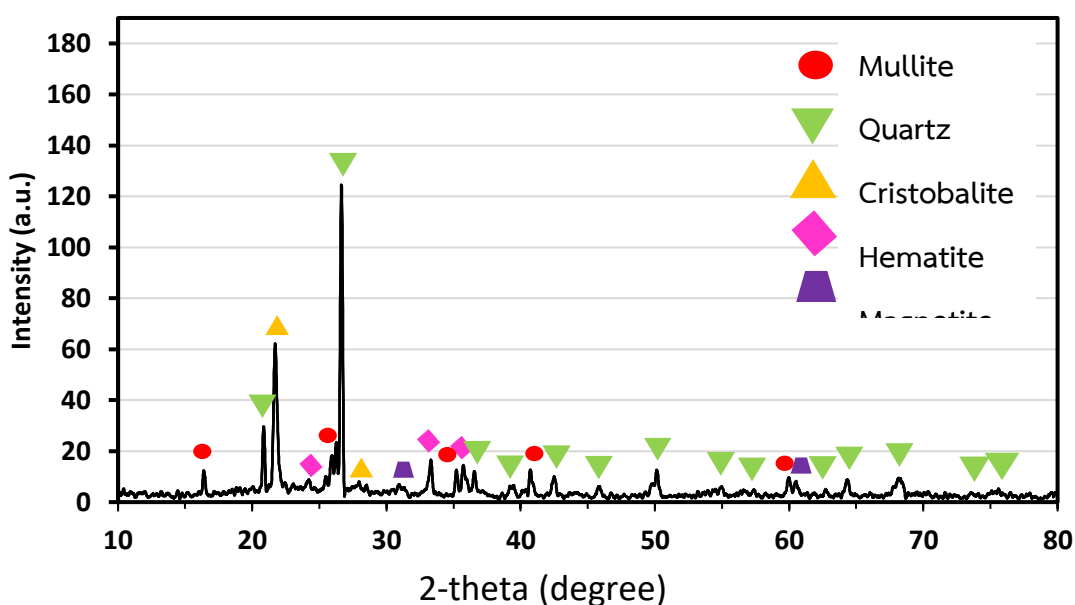


รูปที่ 4.41 ผลการวิเคราะห์ค่าสีในระบบCIELab ของชิ้นงานดินดำปราจีนบุรี

4.3.2 องค์ประกอบเฟสโครงสร้างผลึก

- ชิ้นงานดินเหนียวราชบุรี

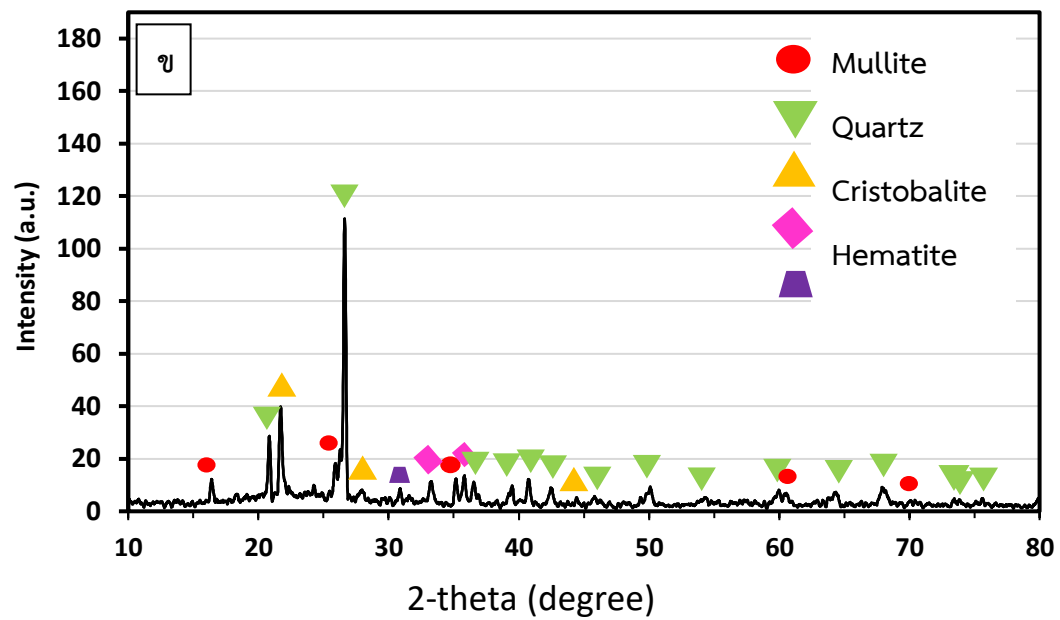
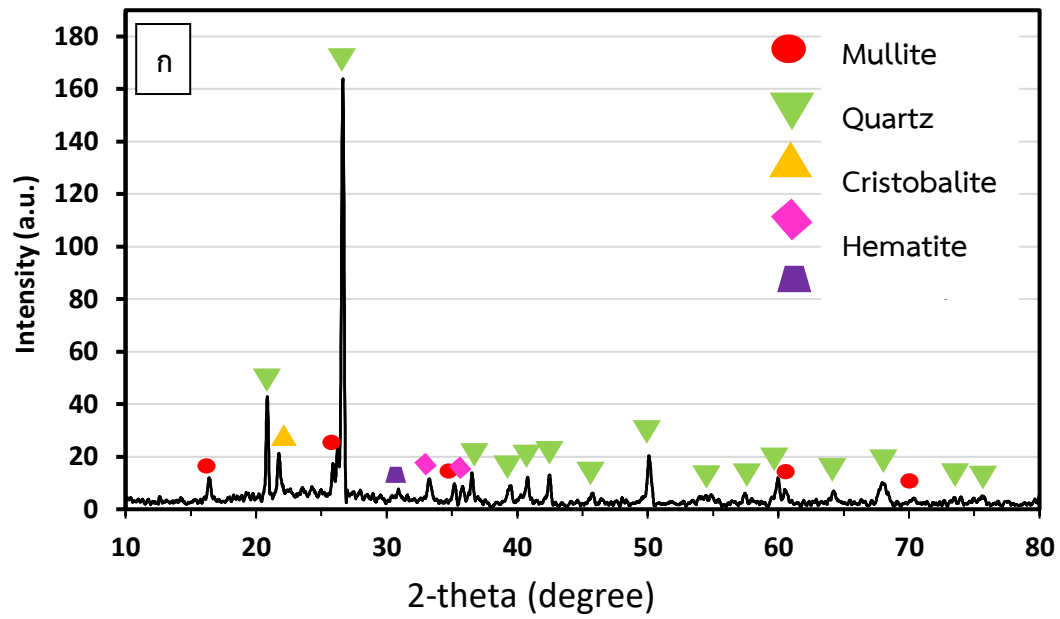
ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกหลังเผาของชิ้นงานดินเหนียวราชบุรีผสมเถ้าหนัก 20 wt% เผาที่อุณหภูมิ 1200 °C แสดงใน **รูปที่ 4.42** ลักษณะของโครงสร้างผลึกจะคล้ายคลึงกับโครงสร้างผลึกของเถ้าหนัก แต่จะมีเฟสคริสโตบาไลต์ (Cristobalite) เพิ่มขึ้นมาในตำแหน่งมุม $2\theta = 21.7$ ซึ่งจะช่วยให้เป็นโครงสร้างให้กับชิ้นงาน นอกจากนี้ยังพบว่ายังคงมีเฟสฮีมาไทต์อยู่ การเผาครั้งนี้ไม่ได้เปลี่ยนฮีมาไทต์ทั้งหมดเป็นแมกนีไทต์สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์สีใน **รูปที่ 4.33** ชิ้นงานยังคงมีสีแดงจากฮีมาไทต์หลงเหลืออยู่



รูปที่ 4.42 โครงสร้างผลึกของชิ้นงานดินเหนียวราชบุรีผสมเถ้าหนัก 20 wt% เผาที่อุณหภูมิ 1200 °C

- ชิ้นงานดินเหนียวจันทบุรี

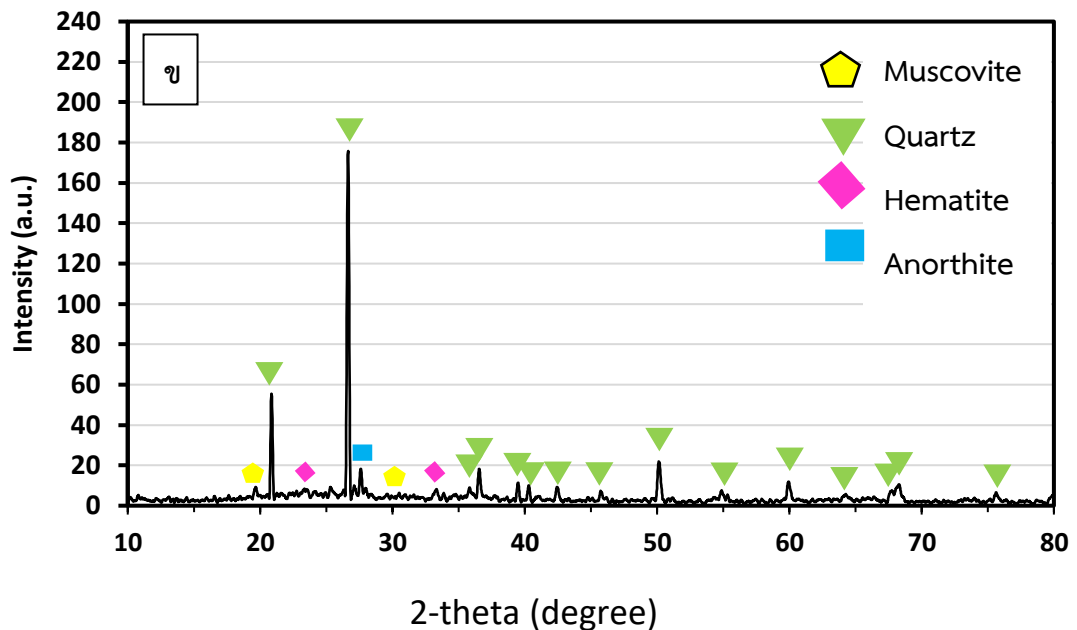
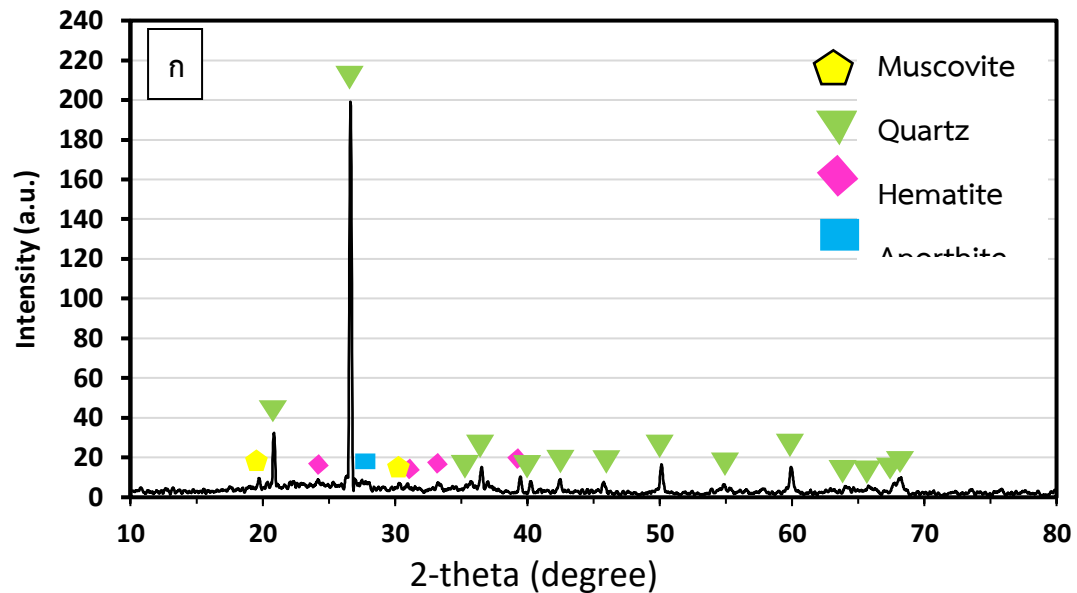
ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกหลังเผาของชิ้นงานดินเหนียวจันทบุรีผสมเถ้าหนัก 20 wt% และผสมเถ้าลอย 20 wt% เผาที่อุณหภูมิ 1200 °C แสดงใน **รูปที่ 4.43** พบว่าทั้งชิ้นงานที่ผสมเถ้าหนักและเถ้าลอย มีองค์ประกอบทางเคมีใกล้เคียงกัน โดยประกอบด้วยมุลไลต์ ควอตซ์ คริสโตบาไลต์ ฮีมาไทต์และแมกนีไทต์ อย่างไรก็ตามกลับไม่พบโครงสร้างผลึกมุลไลต์ในดินหรือในเถ้าลอย คาดว่าเกิดจากการมีองค์ประกอบที่ไม่ได้อยู่ในรูปโครงสร้างผลึกมาก องค์ประกอบดังกล่าวจะทำให้การตรวจจับการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ถูกรบกวน ทำให้ความเข้มของรังสีเอกซ์ลดลง เฟสมุลไลต์จึงแสดงผลได้ไม่ชัดเจน



รูปที่ 4.43 โครงผลึกของชิ้นงานดินเหนียวจันทบุรีเผาที่อุณหภูมิ 1200 °C ก) ผสมเถ้าหนัก 20 wt%
ข) ผสมเถ้าลอย 20 wt%

- ชิ้นงานดินเหนียวอ่างทอง

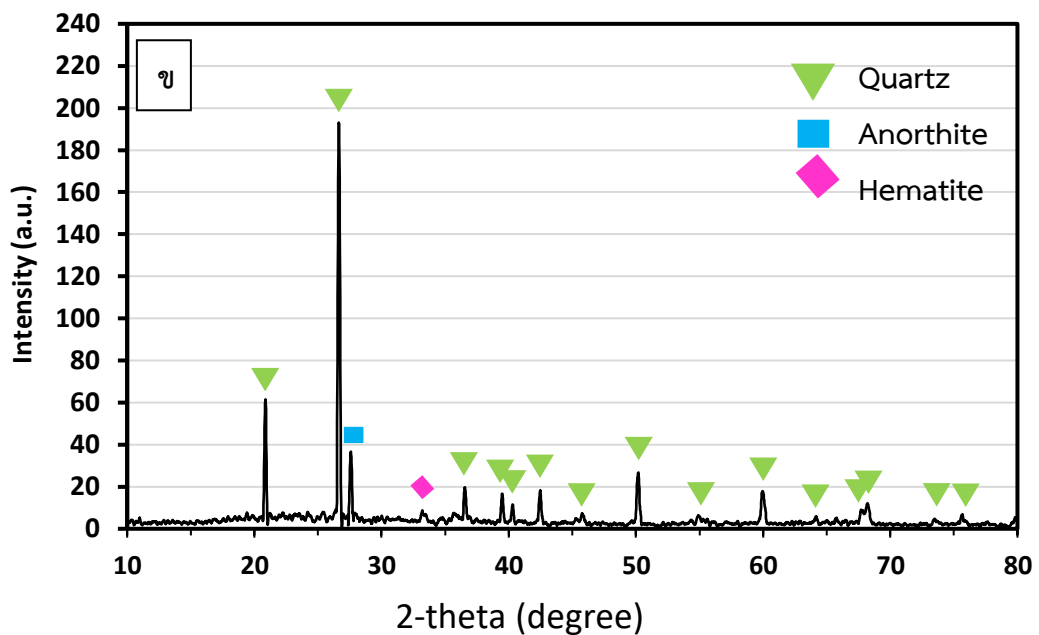
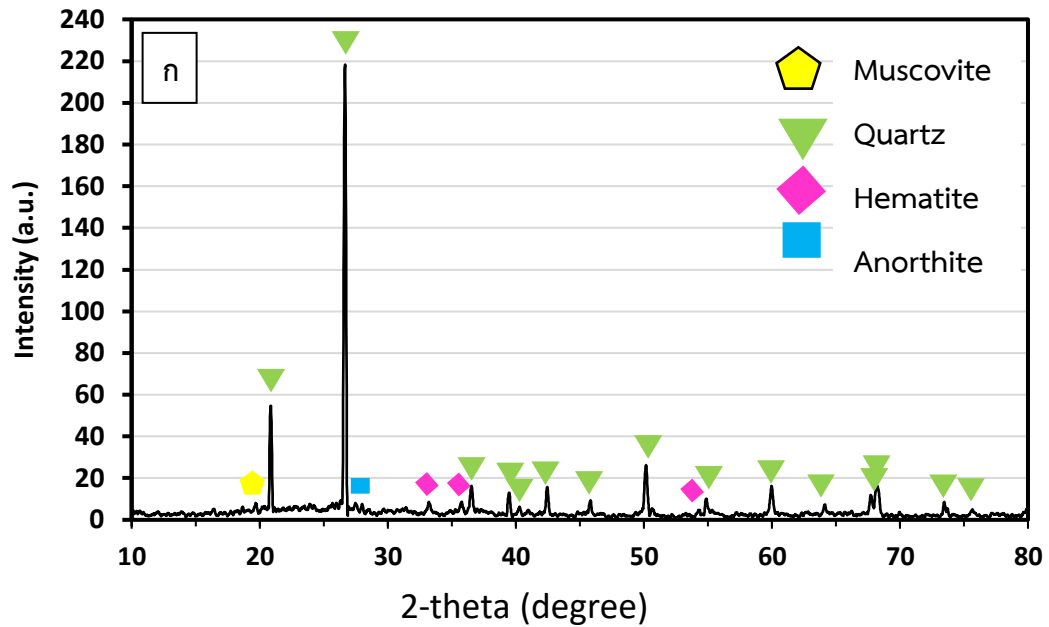
ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของชิ้นงานดินเหนียวอ่างทองผสมเถ้าหนัก 20 wt% และผสมเถ้าลอย 20 wt% เเผาที่อุณหภูมิ 900 °C แสดงใน รูปที่ 4.44 พบว่าเมื่อผสมเถ้าหนักหรือเถ้าลอยจะมีโครงสร้างผลึกคล้ายคลึงกัน โดยจะประกอบด้วยมัสโคไวท์ ควอตซ์ ฮีมาไทต์ และอะนอร์ไทต์ โดยมีมัสโคไวท์มาจากดิน ซึ่งคาดว่า การเผาที่อุณหภูมิ 900 °C ยังไม่ทำให้มัสโคไวท์เปลี่ยนรูป จึงยังคงมีอยู่ในชิ้นงาน



รูปที่ 4.44 โครงสร้างผลึกของชิ้นงานดินเหนียวอ่างทองเผาที่อุณหภูมิ 1200 °C ก) ผสมเถ้าหนัก 20 wt% และ ข) ผสมเถ้าลอย 20 wt%

- ชั้นงานดินเหนียวชลบุรี

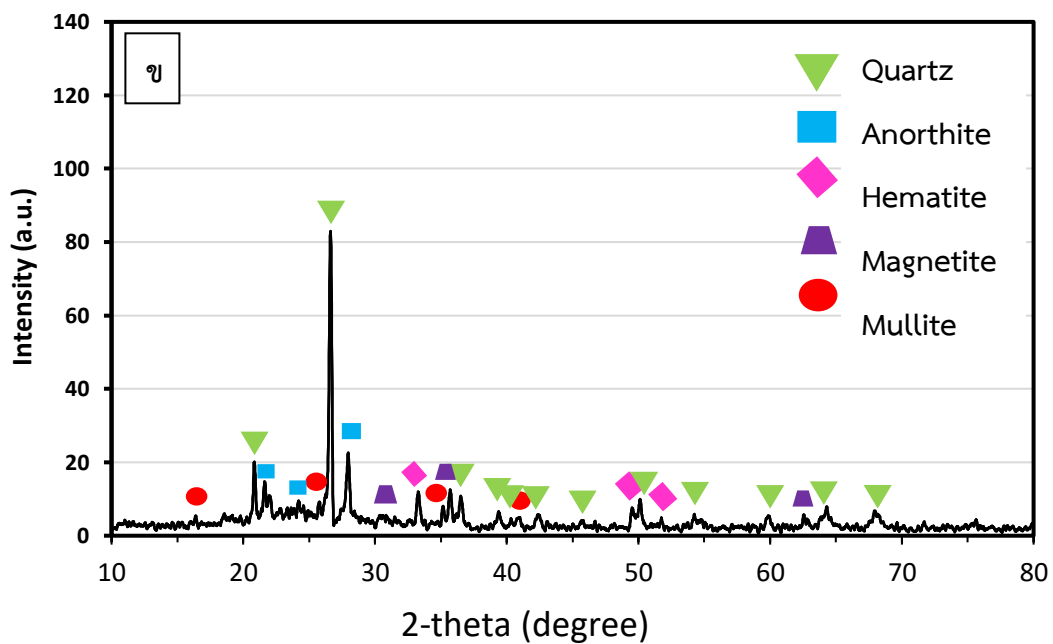
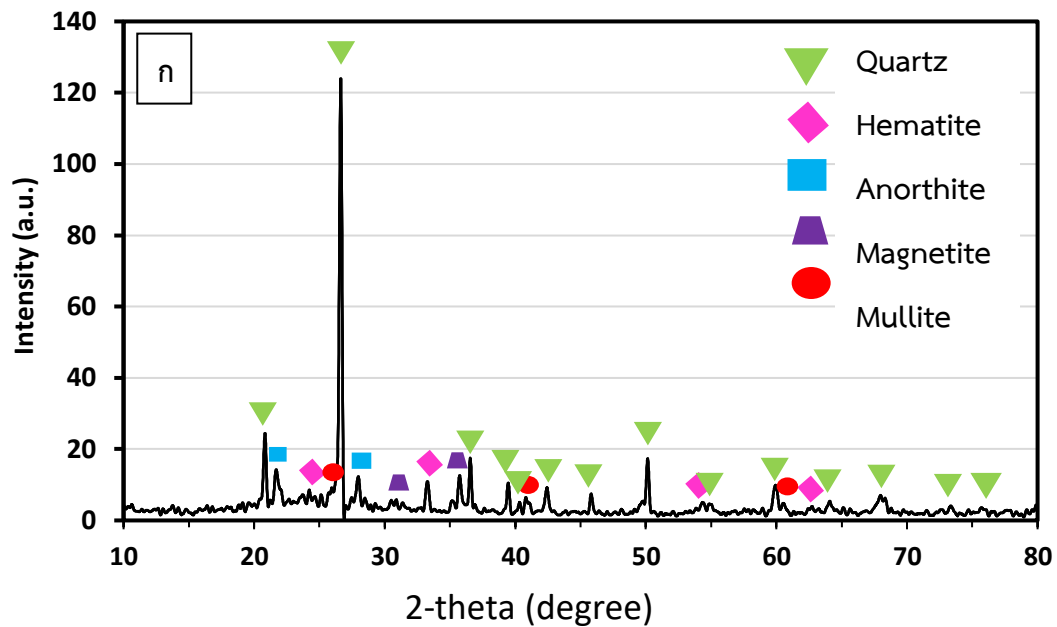
ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของชั้นงานดินเหนียวชลบุรีผสมเถ้าหนัก 20 wt% และผสมเถ้าลอย 20 wt% เเผาที่อุณหภูมิ 900 °C แสดงใน รูปที่ 4.45 พบว่าเมื่อผสมเถ้าหนักจะยังคงเหลือเฟสของมัสโคไวท์จากดินอยู่ แต่เมื่อผสมเถ้าลอยกลับไม่พบเฟสดังกล่าว คาดว่ามัสโคไวท์อาจเกิดการเปลี่ยนรูปจนเหลือในปริมาณน้อยหรือเปลี่ยนรูปโดยสมบูรณ์จนไม่พบเฟสดังกล่าว



รูปที่ 4.45 โครงสร้างผลึกของชั้นงานดินเหนียวชลบุรีเผาที่อุณหภูมิ 1200 °C ก) ผสมเถ้าหนัก 20 wt% และ ข) ผสมเถ้าลอย 20 wt%

- ชั้นงานดินดำปราจีนบุรี

ผลจากการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของชั้นงานดินดำปราจีนบุรี ผสมเถ้าหนัก 50 wt% และผสมเถ้าลอย 50 wt% เเผาที่อุณหภูมิ 1150 °C แสดงใน รูปที่ 4.46 พบว่าองค์ประกอบเฟสของชั้นงานจะคล้ายคลึงกัน โดยประกอบด้วยควอตซ์ ฮีมาไทต์ อะนอร์ไทต์ แมกนีไทต์ และมุลไลต์



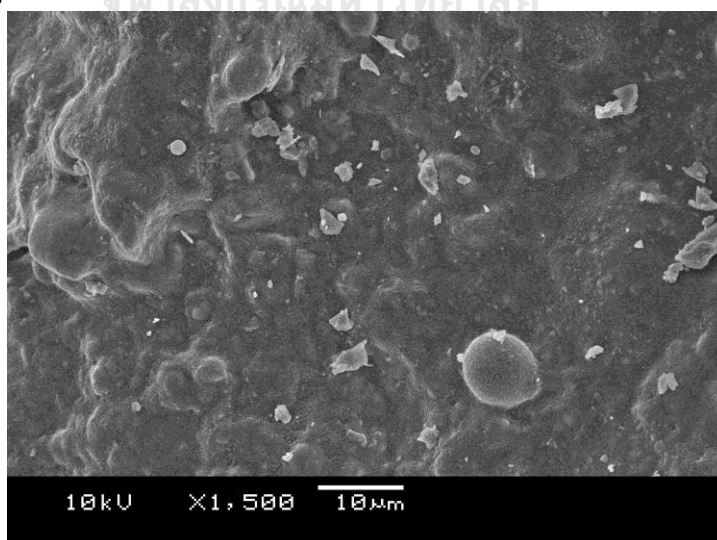
รูปที่ 4.46 โครงสร้างผลึกที่อยู่ในชั้นงานผลิตภัณฑ์กระเบื้อง ก) ดินปราจีนบุรีผสมเถ้าหนัก 50 wt% และ ข) ดินปราจีนบุรีผสมเถ้าลอย 50 wt%

จากการวิเคราะห์โครงสร้างหลังผ่านการเผาของชิ้นงานดินเหนียวราชบุรี จันทบุรี อ่างทอง ชลบุรี และดินดำปราจีนบุรี พบว่าเฟสที่ปรากฏขึ้นบนชิ้นงานของดินทุกชนิด คือ ควอตซ์และฮีมาไทต์ โดยควอตซ์จะเป็นโครงสร้างหลักให้กับชิ้นงานร่วมกับเฟสอื่น เช่น มุลไลต์ อะนอร์ไทต์ หรือคริสโตบาไลต์ นอกจากนี้ยังพบแมกนีไทต์ในชิ้นงานดินเหนียวราชบุรี จันทบุรี และดินดำปราจีนบุรี คาดว่าเกิดจากการเปลี่ยนรูปของฮีมาไทต์ สอดคล้องกับสีของชิ้นงานตาม **รูปที่ 4.32, รูปที่ 4.34, รูปที่ 4.36, รูปที่ 4.38, และ รูปที่ 4.40** ตามลำดับ ที่จะมีสีคล้ำดำขึ้นเมื่อผสมเถ้าหนักหรือเถ้าลอย ในขณะที่ชิ้นงานดินเหนียวอ่างทองและชลบุรีกลับไม่พบเฟสดังกล่าว ทำให้สันนิษฐานได้ว่าการเปลี่ยนรูปดังกล่าวเกิดขึ้นกับชิ้นงานที่เผาสูงกว่า 1000 °C นอกจากนี้ยังพบเฟสมีสโคไวท์ซึ่งอยู่ในดินก่อนเผาจากชิ้นงานดินเหนียว 2 ชนิดดังกล่าว ทำให้อธิบายได้ว่าเฟสมีสโคไวท์จะสลายตัวไปเมื่อเผาที่อุณหภูมิสูงกว่า 1000 °C เมื่อพิจารณาชิ้นงานที่ผสมเถ้าลอยพบว่าไม่มีเฟสอะนอร์ไทต์ ในขณะที่ผลวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของเถ้าลอย **รูปที่ 4.4 ข)** ไม่พบสัญญาณของอะนอร์ไทต์ปรากฏขึ้น คาดว่าเกิดจากการมีองค์ประกอบที่ไม่ได้อยู่ในรูปโครงสร้างผลึกมาก องค์ประกอบดังกล่าวจะทำให้การตรวจจับการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ถูกรบกวน เฟสบางเฟสซึ่งอาจจะเป็นเฟสอะนอร์ไทต์ไม่ปรากฏชัดเจน

4.3.3 โครงสร้างจุลภาค

- ชิ้นงานดินเหนียวราชบุรี

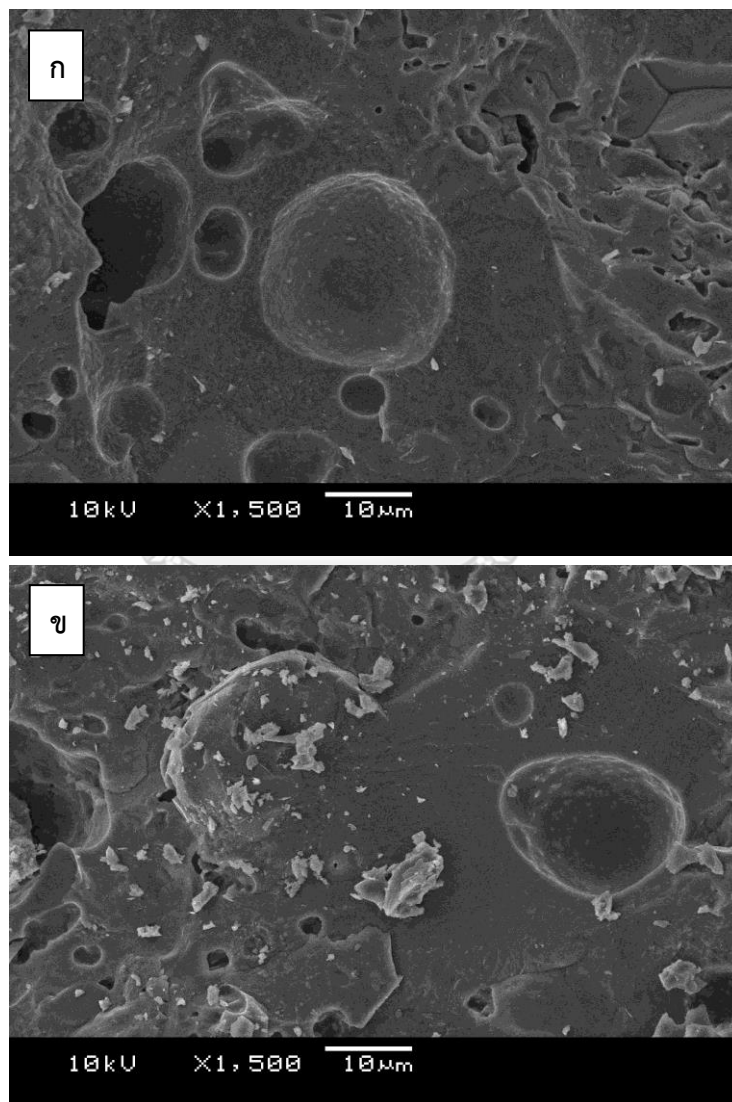
โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานดินเหนียวราชบุรีผสมเถ้าหนัก 20 wt% เผาที่อุณหภูมิ 1200 °C แสดงใน **รูปที่ 4.47** เนื้อชิ้นงานแน่นและแข็งตัวเกาะกันเป็นอย่างดี มีอนุภาคกลมซึ่งสอดคล้องกับอนุภาคของเถ้าหนักใน **รูปที่ 4.5 ก)** ค่าการดูดซึมน้ำต่ำ (น้อยกว่า 8%) และมีความแข็งแรงสูงเมื่อเทียบกับชิ้นงานสูตรอ้างอิง



รูปที่ 4.47 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานดินเหนียวราชบุรีผสมเถ้าหนัก 20 wt% เผาที่อุณหภูมิ 1200 °C

- ชิ้นงานดินเหนียวจันทบุรี

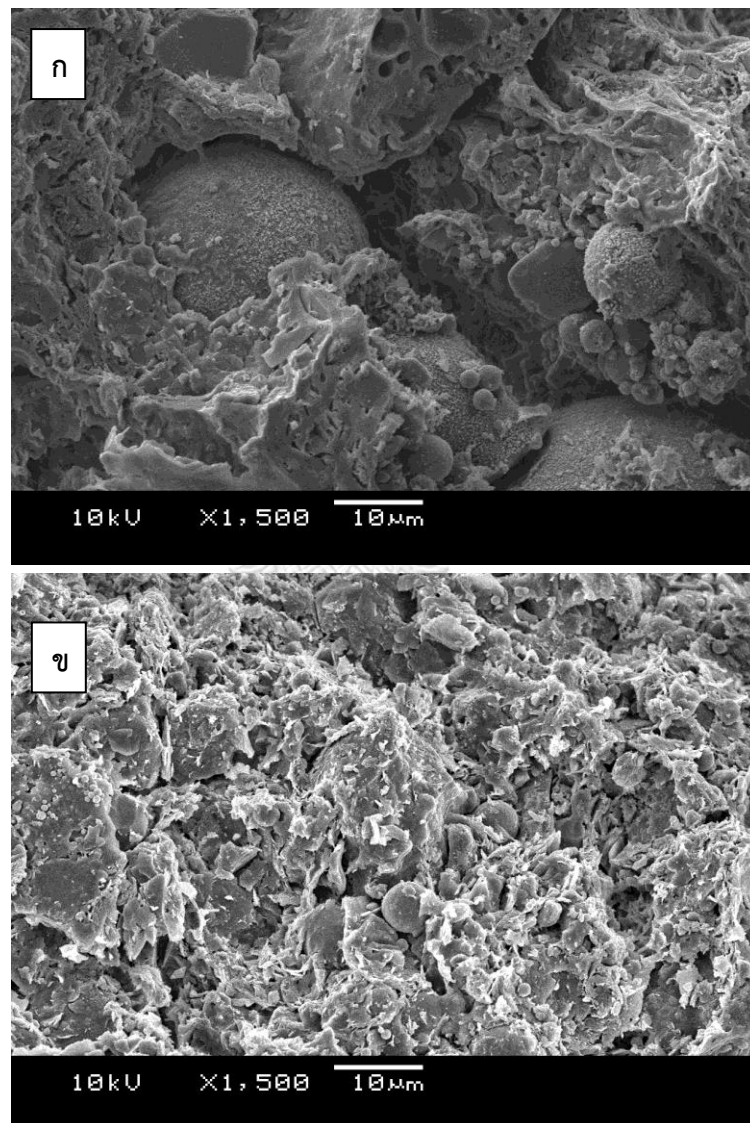
โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานดินเหนียวจันทบุรีผสมเถ้าหนัก 20 wt% และผสมเถ้าลอย 20 wt% เผาที่อุณหภูมิ 1200 °C แสดงใน **รูปที่ 4.48** จากรูปพบว่า มีรูพรุนเล็กน้อยและมีหลุมทรงกลมหรือวงรี ซึ่งอาจเป็นรูพรุนที่เกิดขึ้น หรือเกิดจากมีอนุภาคเถ้าหนักหรือเถ้าลอยเคยอยู่บริเวณดังกล่าว แต่หลุดออกไปจากการทุบชิ้นงาน อย่างไรก็ตาม จากรูปแสดงให้เห็นถึงลักษณะของเนื้อชิ้นงานตัวอย่างที่เกาะติดกัน ทำให้ค่าการดูดซึมน้ำไม่สูง ชิ้นงานเถ้าหนักมีรูพรุนมากกว่าชิ้นงานเถ้าลอย สอดคล้องกับค่าการดูดซึมน้ำของชิ้นงานเถ้าหนักที่สูงกว่าชิ้นงานเถ้าลอย **รูปที่ 4.23**



รูปที่ 4.48 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานดินเหนียวจันทบุรี เผาที่อุณหภูมิ 1200 °C ก) ผสมเถ้าหนัก 20 wt% และ ข) ผสมเถ้าลอย 20 wt%

- ชีงงานดินเหนียวอ่างทอง

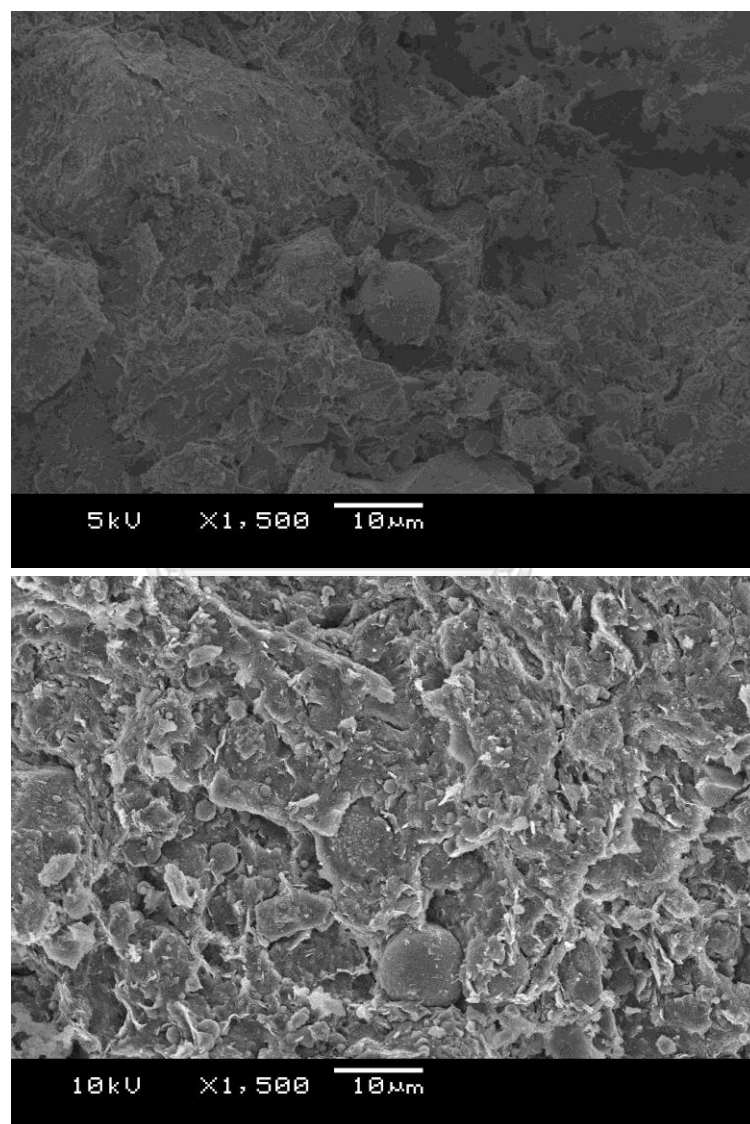
โครงสร้างจุลภาคของชีงงานดินเหนียวอ่างทองผสมเถ้าหนัก 20 wt% และผสมเถ้าลอย 20 wt% เผาที่อุณหภูมิ 900 °C แสดงใน **รูปที่ 4.49** จากรูปพบว่าเนื้อของชีงงานไม่ได้ยึดเกาะตัวแน่นเหมือนชีงงานดินเหนียวราชบุรีและจันทบุรี สอดคล้องกับค่าการดูดซึมน้ำที่สูงกว่าชีงงาน 2 ชนิดดังกล่าว อย่างไรก็ตามชีงงานยังมีลักษณะเกาะตัวเป็นแพอยู่บ้าง มีอนุภาคทรงกลมคาดว่าเป็นอนุภาคของเถ้าเกาะอยู่บนผิวของแพและกระจายตัว แทรกตัวอยู่ในชีงงาน



รูปที่ 4.49 โครงสร้างจุลภาคของชีงงานดินเหนียวอ่างทอง เผาที่อุณหภูมิ 900 °C ก) ผสมเถ้าหนัก 20 wt% และ ข) ผสมเถ้าลอย 20 wt%

- ชิ้นงานดินเหนียวชลบุรี

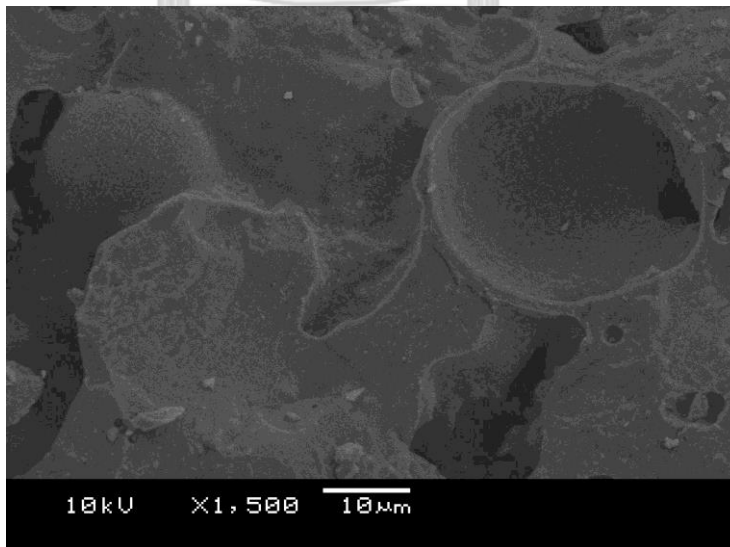
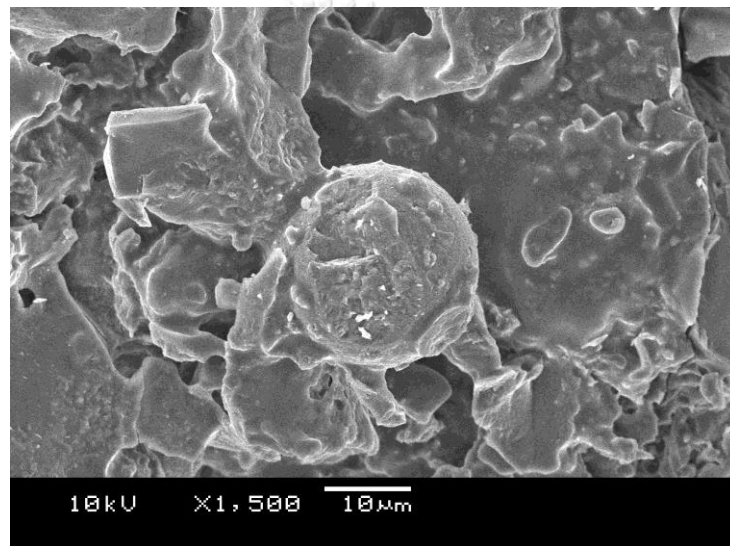
โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานดินเหนียวชลบุรีผสมเถ้าหนัก 20 wt% และผสมเถ้าลอย 20 wt% เผาที่อุณหภูมิ 900 °C แสดงใน **รูปที่ 4.50** ชิ้นงานที่ผสมเถ้าหนัก **รูปที่ 4.50 ก)** เนื้อชิ้นงานมีลักษณะยึดเกาะตัวดี และเห็นอนุภาคทรงกลมซึ่งคาดว่าจะเป็เถ้าหนักกระจายตัวอยู่ในเนื้อชิ้นงาน ชิ้นงานที่ผสมเถ้าลอย **รูปที่ 4.50 ข)** เนื้อชิ้นงานจะไม่ได้ยึดเกาะตัวแน่นเหมือนชิ้นงานดินเหนียวราชบุรีและจันทบุรี แต่จากรูปพบว่ามีอนุภาคของเถ้าลอยไปอุดอยู่ตามรูพรุน ค่าการดูดซึมน้ำจึงไม่สูง (ประมาณ 15%) จัดอยู่ในชิ้นงานชั้นคุณภาพ ก ตามมาตรฐานมอก.77-2545



รูปที่ 4.50 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานดินเหนียวชลบุรี เผาที่อุณหภูมิ 900 °C ก) ผสมเถ้าหนัก 20 wt% และ ข) ผสมเถ้าลอย 20 wt%

- ชีงงานดินดำปราจีนบุรี

โครงสร้างจุลภาคของชีงงานดินดำปราจีนบุรีผสมเถ้าหนัก 50 wt% และผสมเถ้าลอย 50 wt% เเผาที่อุณหภูมิ 1150 °C แสดงใน **รูปที่ 4.51** พบว่ามีอนุภาคทรงกลมขนาดใหญ่แทรกตัวอยู่ในชีงงานทั้ง 2 แบบ ชีงงานที่ผสมเถ้าหนักเนื้อชีงงานเกาะกัน แต่ไม่แน่นตัวเท่าใด ช่องว่างตามระนาบอยู่บ้าง **รูปที่ 4.51 ก)** แต่ชีงงานที่ผสมเถ้าลอยกลับพบว่าเนื้อชีงงานเกาะแน่น มีความเป็นเนื้อเดียวกัน แปะไม่มีรูพรุน **รูปที่ 4.51 ข)** ซึ่งสอดคล้องกับค่าการดูดซึมน้ำใน **รูปที่ 4.26** คาดว่าเกิดจากส่วนผสมที่ใช้น้ำน้อย จึงทำให้รูพรุนน้อย กอปรกับเถ้าลอยมีขนาดเล็กจึงสามารถหลอมผสมเป็นเนื้อเดียวกันได้ง่ายเมื่อเผา



รูปที่ 4.51 โครงสร้างจุลภาคของชีงงานดินดำปราจีนบุรี เเผาที่อุณหภูมิ 1150 °C ก) ผสมเถ้าหนัก 50 wt% และ ข) ผสมเถ้าลอย 50 wt%

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษา ทดลอง และวิเคราะห์ผลเกี่ยวกับผลใช้เถ้าถ่านหินบิทูมินัสทั้ง 2 ชนิด ได้แก่ เถ้าหนัก และเถ้าลอย ทดแทนวัสดุตัวเติมในเนื้อผลิตภัณฑ์เซรามิกเครื่องปั้นดินเผาจาก 5 กลุ่ม โดยใช้ดินท้องถิ่นของกลุ่มอุตสาหกรรมนั้นๆ ได้แก่ กลุ่มอุตสาหกรรมโถงมังกรจังหวัดราชบุรี กลุ่มอุตสาหกรรมเครื่องปั้นดินเผาจังหวัดจันทบุรี กลุ่มอุตสาหกรรมอิฐดินเผาก่อสร้างจังหวัดอ่างทอง กลุ่มอุตสาหกรรมอิฐดินเผาก่อสร้างจังหวัดชลบุรี และกลุ่มอุตสาหกรรมกระเบื้องเซรามิกจังหวัดสระบุรี ได้ข้อสรุปดังนี้

1. เมื่อผสมเถ้าหนักและเถ้าลอยค่าการหดตัวหลังอบแห้งลดลงเมื่อผสมกับชิ้นงานดินเหนียวราชบุรี จันทบุรี อ่างทอง และชลบุรี หากผสมเข้ากับชิ้นงานดินดำปราจีนบุรีจะทำให้ชิ้นงานเกิดปรากฏการณ์ Springback ชิ้นงานมีแนวโน้มการขยายตัวเพิ่มขึ้น 0-0.5% เมื่อผสมเถ้าหนักและเถ้าลอย 40, 50 และ 60 wt%

2. เมื่อผสมเถ้าหนักค่าการหดตัวหลังเผาของชิ้นงานดินเหนียวราชบุรี และดินดำปราจีนบุรีลดลงประมาณ 0.5-1.5 แต่ค่าจะใกล้เคียงและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อผสมกับชิ้นงานดินเหนียวจันทบุรี อ่างทองและชลบุรี เมื่อผสมเถ้าลอยค่าการหดตัวหลังเผาใกล้เคียงกันและมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อผสมในสัดส่วนที่มากขึ้นกับชิ้นงานดินทั้ง 5 ชนิด

3. เมื่อผสมเถ้าหนักค่าการดูดซึมน้ำของชิ้นงานดินเหนียวราชบุรี จันทบุรี อ่างทอง และชลบุรีใกล้เคียงและมีแนวโน้มสูงขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับสูตรอ้างอิง ค่าการดูดซึมน้ำจะสูงขึ้นอย่างมากเมื่อผสมกับชิ้นงานดินดำปราจีนบุรี เมื่อผสมเถ้าลอยทำให้ค่าการดูดซึมน้ำมีค่าใกล้เคียงและมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อผสมกับชิ้นงานดินเหนียวราชบุรี จันทบุรี อ่างทอง และชลบุรี แต่ค่าการดูดซึมน้ำลดลงอย่างมากเมื่อผสมกับชิ้นงานดินดำปราจีนบุรี

4. เมื่อผสมเถ้าหนักชิ้นงานมีค่าโมดูลัสแตกร้าวใกล้เคียงและสูงขึ้น หากผสม 10 wt% เข้ากับชิ้นงานดินเหนียวราชบุรี จันทบุรี อ่างทอง และชลบุรี ค่าโมดูลัสแตกร้าวมีแนวโน้มลดลงเมื่อสัดส่วนของเถ้าหนักสูงขึ้น ค่าโมดูลัสแตกร้าวลดลงอย่างมากเมื่อผสมกับชิ้นงานดินดำปราจีนบุรี เมื่อผสมเถ้าลอย 10 wt% ค่าการดูดซึมน้ำใกล้เคียงและมีแนวโน้มสูงขึ้นเทียบกับชิ้นงานอ้างอิงเมื่อผสม 20 wt% หากสัดส่วนเถ้าลอยเพิ่มขึ้นเป็น 30 และ 40 wt% ค่าการดูดซึมน้ำมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย

5. เมื่อผสมเถ้าหนักและเถ้าลอย ชิ้นงานดินเหนียวราชบุรี จันทบุรี อ่างทอง และชลบุรีหลังเผาจะไม่ปรากฏความแตกต่างของสีแดงอย่างชัดเจน แต่ชิ้นงานจะมีสีคล้ำขึ้นเมื่อปริมาณของเถ้า

สูงขึ้นซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนรูปของฮีมาไทต์เป็นแมกนีไทต์ ชั้นงานดินดำปราจีนบุรีจะมีสีแดงสดขึ้นเมื่อผสมเถ้าทั้ง 2 ชนิด แต่จะมีสีคล้ำขึ้นเมื่อสัดส่วนของเถ้าสูงขึ้นเช่นกัน

6. องค์ประกอบเฟสโครงผลึกของชั้นงานดินทั้ง 5 ชนิดเมื่อผสมเถ้าหนักและเถ้าลอยคล้ายคลึงกัน ชั้นงานดินเหนียวอ่างทองและชลบุรีจะยังพบเฟสมีสโคไวท์จากดินเพราะเผาที่อุณหภูมิไม่สูง (800-1000 °C)

7. เถ้าหนักและเถ้าลอยกระจายตัวได้ดีเมื่อผสมอยู่ในชั้นงาน เถ้าลอยจะผสมกลมกลืนเข้ากับเนื้อชั้นงานได้ดีกว่าเถ้าหนักเนื่องจากมีขนาดอนุภาคเล็กกว่า นอกจากนี้ยังช่วยอุดตามรูพรุนขนาดเล็ก สอดคล้องกับค่าการดูดซึมน้ำที่ลดลง

โดยภาพรวมสมบัติทั้งหมดได้ข้อสรุปว่า หากผสมเถ้าหนักและเถ้าลอยในชั้นงานดินเหนียวราชบุรี จันทบุรี อ่างทอง และชลบุรีไม่ควรผสมเกินกว่า 20 wt% เพราะจะทำให้ชั้นงานหดตัวหลังเผามากขึ้น การดูดซึมน้ำสูงขึ้น (สำหรับผสมเถ้าหนัก) นอกจากนี้ยังทำให้ชั้นงานมีความเหนียวลดลงจนอาจขึ้นรูปยาก ชั้นงานไม่ยึดติดกัน และมีสีคล้ำขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ทดลองขึ้นรูปชั้นงานเป็นผลิตภัณฑ์ขนาดจริงที่มีผลิอยู่ในโรงงาน เพื่อให้วิศวกรที่สมบัติได้ใกล้เคียงกับชั้นงานในโรงงาน
2. ทดลองเคลือบด้วยน้ำเคลือบสูตรของโรงงานในกรณีของโองมังกรราชบุรีและโองจังหวัดจันทบุรี เพื่อศึกษาผลของการเติมเถ้าถ่านหินที่จะกระทบต่อลักษณะต่างๆ ของเคลือบ



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บรรณานุกรม

- [1] การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, **สัดส่วนการใช้เชื้อเพลิงผลิตพลังงานไฟฟ้าในระบบของ กฟผ. ปี 2560**, accessed date: 13/2/2561, available online at: https://www.egat.co.th/index.php?option=com_content&view=article&id=2068&Itemid=116.
- [2] สำนักนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน, **การผลิต การใช้ และการนำเข้่าถ่านหิน/ถ่านหินลิกไนต์ ปี 2560**, accessed date: 14/2/2561, available online at: [http://www.eppo.go.th/index.php/th/energy-information/static-energy/coal-lignite?orders\[publishUp\]=publishUp&issearch=1](http://www.eppo.go.th/index.php/th/energy-information/static-energy/coal-lignite?orders[publishUp]=publishUp&issearch=1)
- [3] S. Torrey, **Coal Ash Utilization Fly Ash, Bottom Ash and Slag**, Noyes Data Corporation, New Jersey, United States, (1978).
- [4] K. Wesche, **Fly Ash in Concrete Properties and Performance**, E&FN SPON, Great Britain, (1991).
- [5] X. Zhuang, L. Chen, S. Komarneni, C. Zhou, D. Tong, H. Yang, W. Yu, H. Wang, **Fly ash-based geopolymers: clean production, properties and applications**, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 125, pp. 253-267 (2016).
- [6] S. Abbas, M. A. Saleem, S. M. S. Kazmi, M. J. Munir, **Production of sustainable clay bricks using waste fly ash: Mechanical and durability properties**, *Journal of Building Engineering*, Vol. 14, pp. 7-14 (2017).
- [7] ฦัฐวิญญ์ ชาวเลิศพรศึยา, พิสุทธิ เพ็ญรมนกุล, รัฐพล เจริญวิริยะบุญมา, ชวีญมนัส มีถาวร, สุทธิดา ศิริมั่งคละ, **ชวณคิต ก่อนคลิกแซร์ : โรงไฟฟ้าถ่านหิน ตอนที่ 2**, accessed date: 28/11/2561, available online at: <https://www.eng.chula.ac.th/wp-content/uploads/2017/04/โรงไฟฟ้าถ่านหิน-ตอนที่2-สถานการณ์ถ่านหินและเทคโนโลยีการใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง.pdf>.
- [8] S. R. Maheswari, **Coal | Types of Coal: Peat, Lignite, Bituminous Coal & Anthracite Coal**, accessed date: 30/11/2561, available online at: <https://www.pmfias.com/coal-formation-of-coal-types-of-coal-peat-lignite-bituminous-coal-anthracite-coal/>.

- [9] กรมพัฒนาพลังงานทดแทน และอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, **ข้อมูลและสถานภาพการใช้ถ่านหินในอุตสาหกรรมของประเทศไทย**, accessed date: 11/9/2561, available online at: http://www.dede.go.th/ewt_news.php?nid=498.
- [10] M. W. Irwin B. H. Bowen, **Coal Characteristics CCTR Basic Facts File #8**, Indiana Center for Coal Technology Research, 2008
- [11] O. C. Kopp, **Subbituminous coal**, accessed date: 30/11/2561, available online at: <https://www.britannica.com/science/subbituminous-coal>.
- [12] E. McKittrick and B. Higman D. Coil, **Coal combustion waste**, accessed date: 27/9/2561, available online at: <http://www.groundtruthtrekking.org/Issues/AlaskaCoal/Coal-Ash-Combustion-Wastes.html>.
- [13] **การทำงานของโรงไฟฟ้าถ่านหิน รู้จักกับโรงไฟฟ้าแม่เมาะ**, accessed date: 25/3/2561, available online at: <http://www.balanceenergythai.com/รู้จักกับโรงไฟฟ้าแม่เมาะ>.
- [14] สำนักบริหารจัดการกากอุตสาหกรรม กรมโรงงานอุตสาหกรรม, **ลักษณะกากอุตสาหกรรมและวิธีกำจัดของโรงงานลำดับที่ 7**, accessed date: 21/1/2561, available online at: <http://facwaste.diw.go.th/file/07.pdf>.
- [15] American Society for Testing Materials, **Annual book of ASTM standards, concrete and aggregates, vol. 04.02**.
- [16] J. Hanania B. Afework, K. Stenhouse, J. donev, **Bottom Ash**, accessed date: 7/10/2561, available online at: https://energyeducation.ca/encyclopedia/Bottom_ash#cite_note-RE1-1.
- [17] อนุรักษ์ ยวงเงิน, **โองม้งกร หัตถศิลป์จากผืนดินราชบุรี**, accessed date: 15/9/2561, available online at: <https://geogtechpnru.files.wordpress.com/2016/02/e0b982e0b8ade0b988e0b887.pdf>.
- [18] กลุ่มวิจัยแร่อุตสาหกรรม กรมทรัพยากรธรณี กระทรวงอุตสาหกรรม, **เนื้อดินปั้น จากโรงโองม้งกรราชบุรี**, พ.ศ.2540
- [19] กรรณิกา โชคบรรดาสุข, **วิธีการทำโอง ราชบุรี**, accessed date: 24/11/2561, available online at: <https://www.youtube.com/watch?v=Yh3NK5BZTYo>.
- [20] สมศักดิ์ ขวาลาวณิชย์, **เซรามิกส์**, โอเดียนสโตร์, กรุงเทพฯ, (2549).
- [21] นกน้อยแห่งโพหัก, **เปิดตำนาน...โองม้งกร..สัญลักษณ์ของราชบุรี**, accessed date: 24/11/2561, available online at: <http://oknation.nationtv.tv/blog/nonglek/2010/10/13/entry-2>.

- [22] จรัสศรี พาสภาการ, **ขั้นตอนการทำโอ่งมังกร**, accessed date: 22/11/2561, available online at: http://jarratchaburi.blogspot.com/2013/01/blog-post_1266.html.
- [23] วลัยลักษณ์ ทรงศิริ, **โบราณคดีโอ่งจันทบูร**, วารสารเมืองโบราณ ปีที่ ๔๔ ฉบับที่1 เดือนมกราคม-มีนาคม ๒๕๖๑ : ศรีมโหสถ นครรัฐ ฟากตะวันออกของกลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยา, pp. 164 (พ.ศ. 2561).
- [24] จารุวรรณ ต้วงคำจันทร์, **แหล่งดินเผาคลองรำพัน บ้านเตาหม้อ**, accessed date: 24/11/2561, available online at: <http://lek-prapai.org/home/view.php?id=5316>.
- [25] เอ็งเอย, **วัดพระศรีสรรเพชญ์**, accessed date: 24/11/2561, available online at: <http://travel.trueid.net/detail/R9ZQgJ5mMyw>.
- [26] บริษัท อิฐแดง2009 จำกัด, **ประวัติอิฐมอญ**, accessed date: 25/11/2561, available online at: <https://www.itdang2009.com/15623328/ประวัติอิฐมอญ>.
- [27] **วิธีทำอิฐมอญ โดยโรงงานอิฐมอญพงษ์เจษฎา**, accessed date: 25/11/2561, available online at: <http://www.pongjadesada.com/42/>.
- [28] น พ พล ชูก ลีน , **อิฐ ดิน เเผา** , accessed date: 25/11/2561 available online at: <https://www.posttoday.com/travel/259280>.
- [29] โรงอิฐประเสริฐชัย, **ภูมิปัญญาไทย อิฐแดงพานทอง**, accessed date: 26/11/2561, available online at: <http://www.otoptoday.com/wisdom/1484/อิฐแดงพานทอง>.
- [30] ภาณุพงศ์ อนันตชัยพัทธนา, **แหล่งเรียนรู้เชิงประวัติศาสตร์ตามคำขวัญของอำเภopanทอง จังหวัดชลบุรี** , accessed date: 26 / 11 / 2561 , available online at: <http://www.panupong.org/07panthong.html>.
- [31] บริษัท กฤษณการย์ จำกัด, **จุดเด่นของอิฐมอญเคเค**, accessed date: 25/11/2561, available online at: <http://www.kritsanakarn.com/>.
- [32] ปรีดา พิมพ์ขาวขำ, **เซรามิกส์**, โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, (พ.ศ.2547).
- [33] C. Leiva, C. Arenas, B. Alonso-fariñas, L. F. Vilches, B. Peceño, M. Rodriguez-galán, F. Baena, **Characteristics of fired bricks with co-combustion fly ashes**, *Journal of Building Engineering*, Vol. 5, pp. 114-118 (2016).
- [34] D. Eliche-Quesada, J. A. Sandalio-Pérez, S. Martínez-Martínez, L. Pérez-Villarejo, P. J. Sánchez-Soto, **Investigation of use of coal fly ash in eco-friendly construction materials: fired clay bricks and silica-calcareous non fired bricks**, *Ceramics International*, Vol. 44 [4], pp. 4400-4412 (2018).

- [35] William Daidone Garth V Tayler, **The Use of Bottom Ash in the Manufacture of Clay Face Brick**, *World of Coal Ash Conference 2011*, Denver, CO, USA, 2011.
- [36] B. Sena da Fonseca, C. Galhano, D. Seixas, **Technical feasibility of reusing coal combustion by-products from a thermoelectric power plant in the manufacture of fired clay bricks**, *Applied Clay Science*, Vol. 104, pp. 189-195 (2015).
- [37] **XRD bruker D8 Advance**, accessed date: 26/11/2561, available online at: <https://www.azom.com/equipment-details.aspx?EquipID=293>.
- [38] **Bruker AXS GmbH - S8 TIGER ECO - WDXRF Spectrometer**, accessed date: 26/11/2561 available online at: <http://www.speciation.net/Database/Instruments/Bruker-AXS-GmbH/S8-TIGER-ECO--WDXRF-Spectrometer-;i3153>.
- [39] P. E. Tsakiridis, M. Samouhos, A. Peppas, N. S. Katsiotis, D. Velissariou, M. S. Katsiotis, M. Beazi, **Silico-aluminous bottom ash valorisation in cement clinker production: Synthesis, characterization and hydration properties**, *Construction and Building Materials*, Vol. 126, pp. 673-681 (2016).
- [40] I. Acar, M. U. Atalay, **Characterization of sintered class F fly ashes**, *Fuel*, Vol. 106, pp. 195-203 (2013).
- [41] J. andrea O. villamizar, H. Jose antonio, C. alberto R. reyes, **A comparative study on conversion of industrial coal by-products in low SiO₂ zeolite of faujasite type**, *DYNA*, Vol. 79, pp. 105-114 (2012).
- [42] P. C. Hess J. P. Greenwood, **Congruent melting kinetics of albite : Theory and experiment**, *Journal of geophysical research*, Vol. 103, pp. 29,815-29,828 (1998).
- [43] T.Hansen, **Potash feldspar**, accessed date: 14/10/2561, available online at: https://digitalfire.com/4sight/material/potash_feldspar_1135.html.
- [44] J. Yu, X. Li, D. Fleming, Z. Meng, D. Wang, A. Tahmasebi, **Analysis on Characteristics of Fly Ash from Coal Fired Power Stations**, *Energy Procedia*, Vol. 17, pp. 3-9 (2012).
- [45] I. Acar, M. U. Atalay, **Recovery potentials of cenospheres from bituminous coal fly ashes**, *Fuel*, Vol. 180, pp. 97-105 (2016).

- [46] M. Ahmaruzzaman, **A review on the utilization of fly ash**, *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 36 [3], pp. 327-363 (2010).
- [47] U. Choudhury, **Effect of fly ash addition on the properties of fired clay**, bachelor, Department of Ceramic Engineering, National Institute of Technology Rourkela, 2015.





จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ญาณวุฒิ วงศ์หอม
วัน เดือน ปี เกิด	22 กุมภาพันธ์ 2537
สถานที่เกิด	Bangkok
วุฒิการศึกษา	ระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนนวมินทราชินูทิศ เตรียมอุดมศึกษา น้อมเกล้า ระดับปริญญาตรี หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรม วัสดุฯ วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้า คุณทหารลาดกระบัง ในเดือนมิถุนายน พ.ศ.2559 และเข้าศึกษาต่อในระดับ ปริญญาโทบัณฑิต วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต หลักสูตรเทคโนโลยีเซรามิก ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในเดือน มกราคม พ.ศ.2560 และสำเร็จการศึกษาในปีการศึกษาปี 2561
ที่อยู่ปัจจุบัน	301/437 หมู่บ้านกิตตินิเวศน์ ซ.รามคำแหง 68 ถนนรามคำแหง แขวง หัวหมาก เขตบางกะปิ กรุงเทพฯ 10240
ผลงานตีพิมพ์	Y. Wonghom et al., "Effects of Bituminous Coal Ash Addition in Pottery Products", Key Engineering Materials, Vol. 798, pp. 242- 247, 2019