บทที่ 4
ผลการทดลองและอภิปรายผล

บทนี้ได้จะได้กล่าวถึงลักษณะเฉพาะของวัตถุดิบที่ใช้ในการศึกษาและอภิปรายผลการทดลอง คุณสมบัติทางกายภาพ คุณสมบัติเชิงกล และค่าการนำความร้อน จากการใช้เศษวัสดุคือ ดิน แกลบข้าว ขี้เลื่อย และเถ้าชานอ้อย เป็นส่วนผสมในการขึ้นรูปตัวอย่างอิฐตามอัตรส่วนต่างๆ ดังนี้ 0, 2.5, 5, 7.5 และ 10 % โดยน้ำหนัก และนำไปเผาที่อุณหภูมิ 900-1100 องศาเซลเซียส ซึ่งผลจากการทดลองอภิปรายได้ดังนี้

4.1 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ (XRF)

ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี (X-ray fluorescence, XRF) ของดิน แกลบข้าว ขี้เลื่อย และเศษที่นำมาใช้ทำอิฐดังแสดงในตารางที่ 4.1

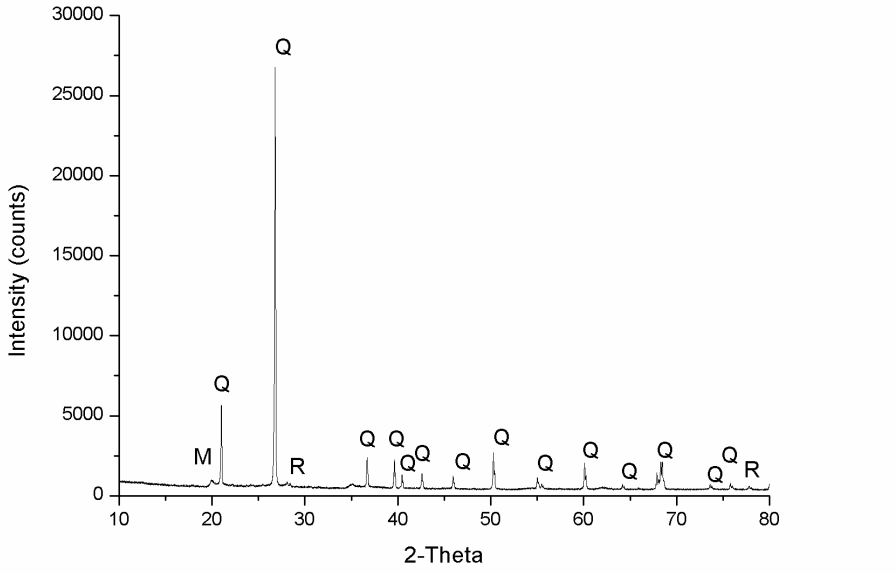
ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบที่นำมาใช้ในการศึกษา

องค์ประกอบทางเคมี	ดิน (wt.%)	แกลบข้าว (wt.%)	ขี้เลื่อย (wt.%)	เถ้าชานอ้อย (wt.%)
SiO_2	58.76	95.40	0.027	88.03
Al_2O_3	21.34	-	0.047	2.31
Fe_2O_3	5.10	-	0.01	3.67
CaO	0.21	0.36	0.107	2.55
K_2O	3.10	1.02	0.060	0.32
Na_2O	-	0.80	0.007	0.28
P_2O_5	-	0.60	0.002	-
TiO_2	0.93	-	0.002	-
MnO	1.18	-	0.001	-
MgO	-	0.25	0.006	-
LOI (Loss on ignition)	8.74	-	99.65	10.57

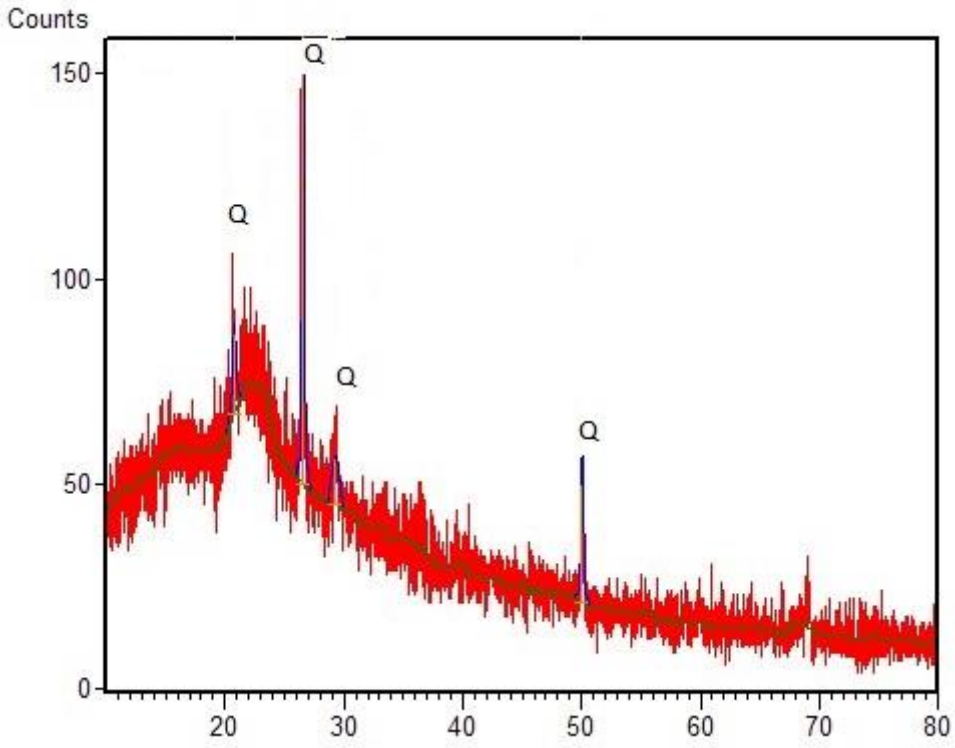
ผลกากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีพบว่า ในองค์ประกอบของ ดิน แกลบข้าว และเถ้าชานอ้อย จะพบปริมาณของ ซิลิกา (SiO_2) ตั้งแต่ 58-95 เปอร์เซ็นต์ โดยจะพบมากในแกลบข้าวและเถ้าชานอ้อย ในขณะที่ดินจะพบปริมาณของอลูมินา (Al_2O_3) คือ 21 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ปริมาณที่สูญหายหลังการเผาของขี้เลื่อยจะมากสุดถึง 99 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้เพราะว่าในองค์ประกอบของขี้เลื่อยจะเป็นกลุ่ม เซลลูโลส ลิกนิน เมื่อนำไปเผาจะพบว่ามีปริมาณเถ้าค่อนข้างเยอะกว่าเศษวัสดุชนิดอื่นๆ โดยผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีแสดงไว้ตามตารางที่ 4.1

4.2 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ของวัตถุดิบ (XRD)

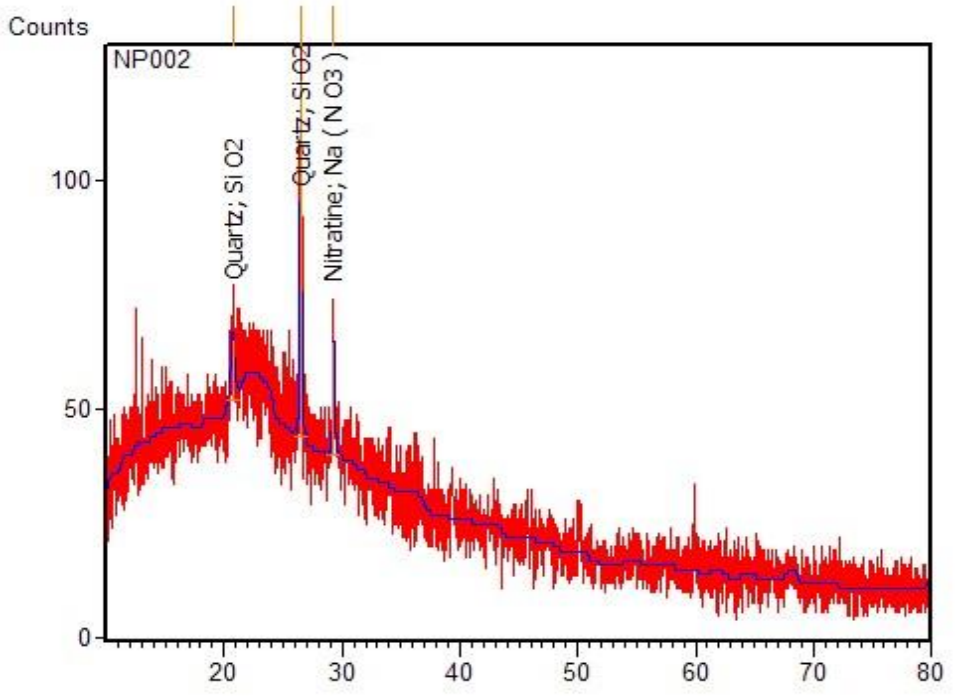
ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ (X-ray diffraction technique, XRD) ของดิน แกลบข้าว ขี้เลื่อย และเถ้าชานอ้อย แสดงตามภาพที่ 4.1 ถึง 4.4 ผลจากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่พบว่าเฟสที่พบในดินคือ คอทซ์ (Quartz) มัสโคไวท์ (Muscovite) และรูไทร์ (Rutile) (ภาพที่ 4.1) ในขณะที่แกลบข้าวพบว่ามีโครงสร้างคอวทซ์เป็นหลักซึ่งสอดคล้องกับผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีจะพบว่าแกลบข้าวจะมีซิลิกาอยู่ในปริมาณที่มากถึง 95 เปอร์เซ็นต์ (ภาพที่ 4.2) ส่วนขี้เลื่อย พบว่าองค์ประกอบทางแร่ประกอบไปด้วยซิลิกาเป็นองค์ประกอบหลัก (ภาพที่ 4.3) และเถ้าชานอ้อยจะพบแร่ คอทซ์ และคิสโตบาไลต์ (Cristobalite) เป็นหลัก (ภาพที่ 4.4)



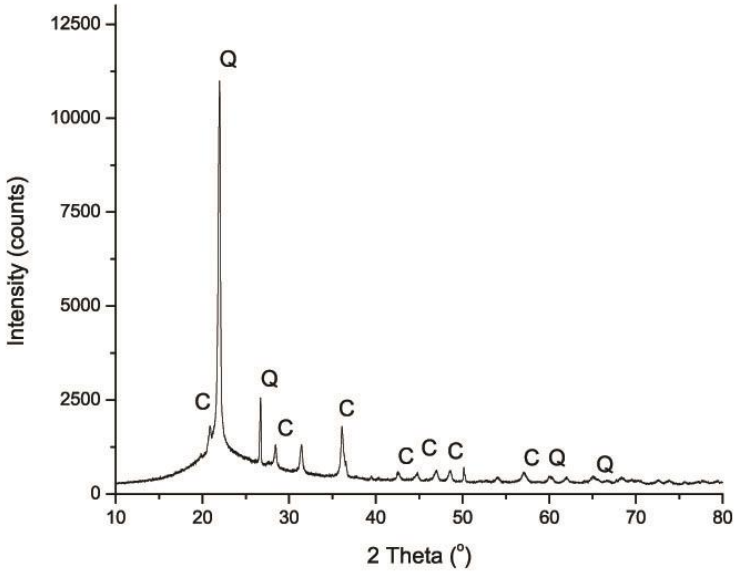
ภาพที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของดินด้วยเทคนิค XRD



ภาพที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของแกลบข้าวด้วยเทคนิค XRD



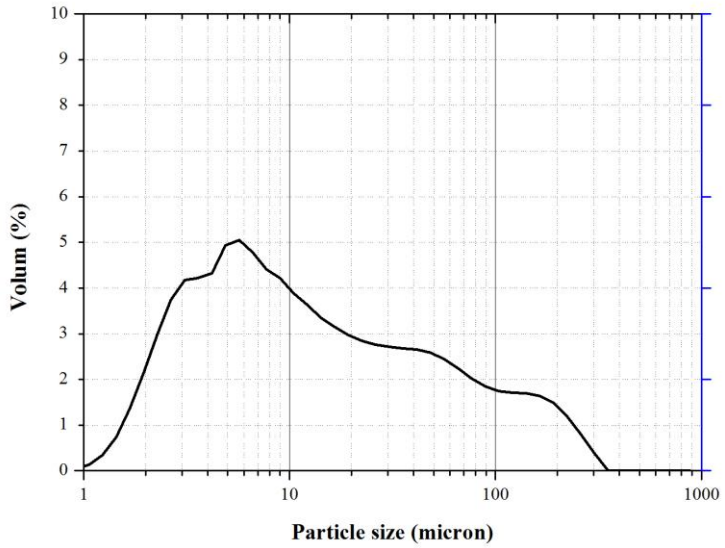
ภาพที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของขี้เลื่อยด้วยเทคนิค XRD



ภาพที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของเถ้าชานอ้อยด้วยเทคนิค XRD

4.3 ผลการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของดิน (Particle size analysis)

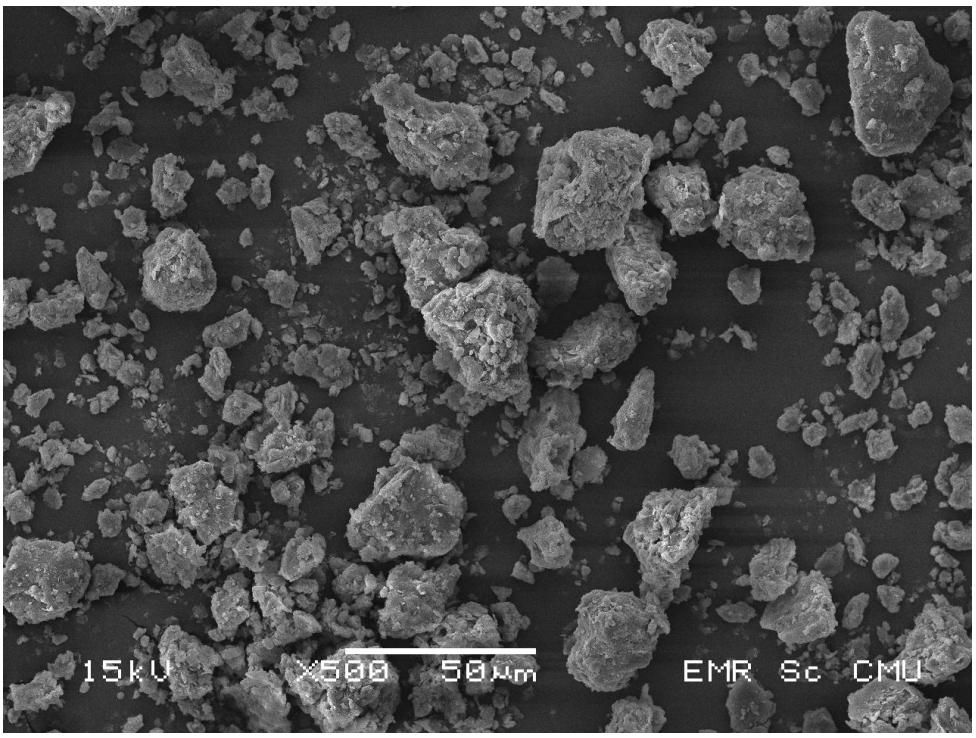
ขนาดอนุภาคของดินที่นำมาใช้สำหรับการทำอิฐได้วิเคราะห์หาขนาดอนุภาค (Particle size distribution) เพื่อศึกษาสภาวะการนำมาใช้งาน เพื่อการขึ้นรูปของอิฐ พบว่าการกระจายตัวของขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 1-200 ไมครอน ดังแสดงตามภาพที่ 4.5



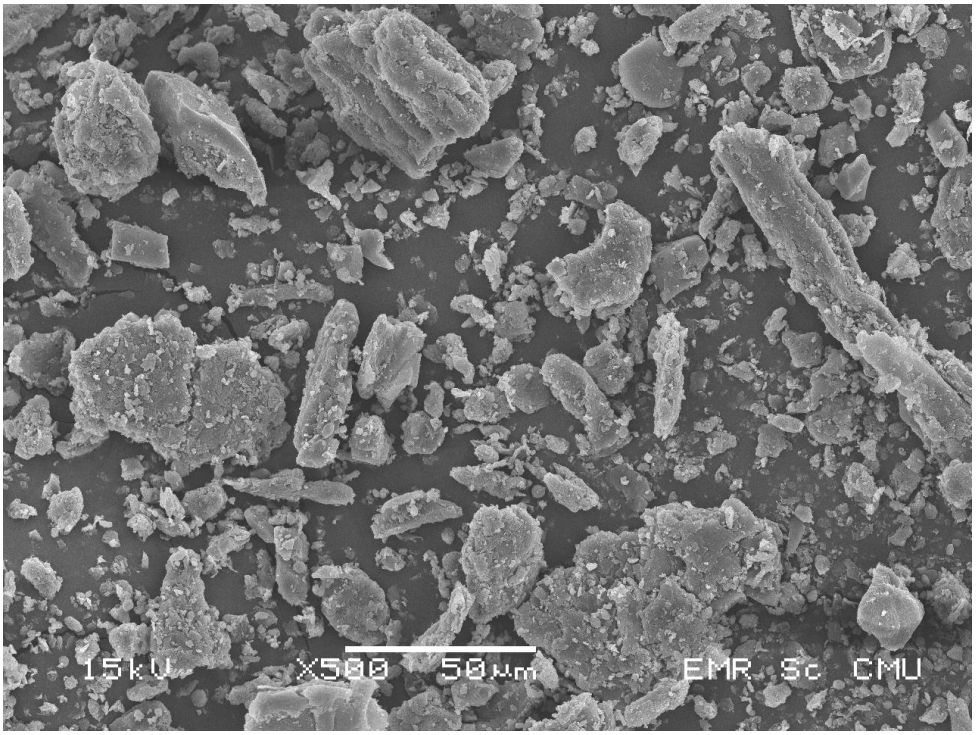
ภาพที่ 4.5 แสดงการกระจายของขนาดอนุภาคของดิน

4.4 ลักษณะสัณฐานวิทยาของวัตถุดิบ

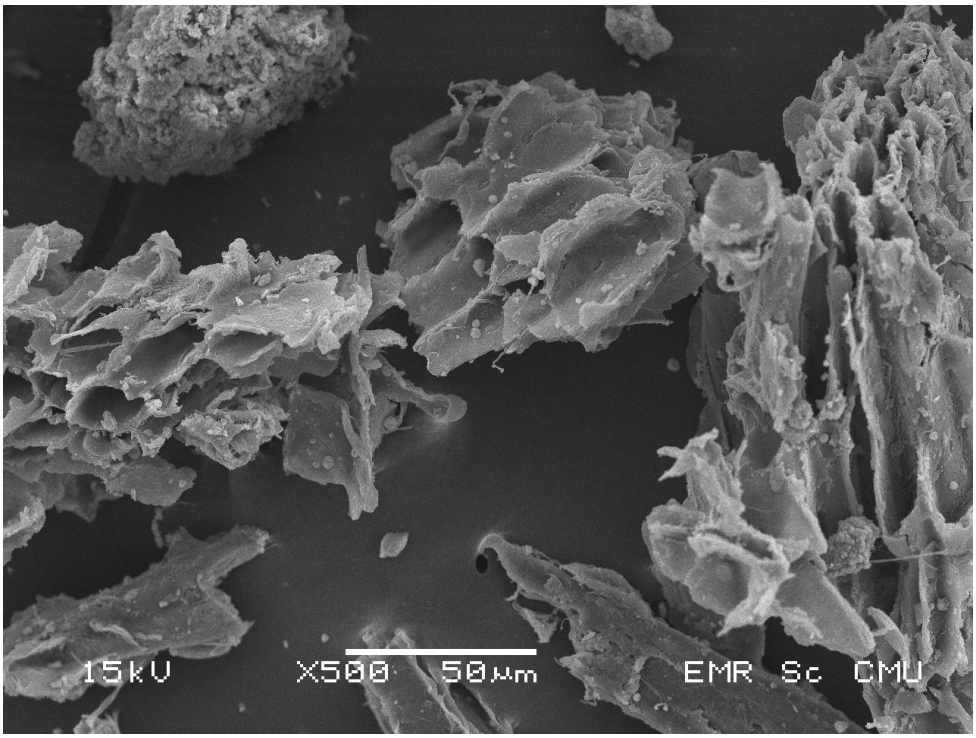
จากภาพที่ 4.6 ถึง 4.9 แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของวัตถุดิบซึ่งถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตอรนชนิดส่องกวาด (Scanning electron microscopy, SEM) พบว่า ลักษณะของดินที่นำมาใช้สำหรับการทดลองนี้สังเกตได้จากการจับตัวกันเป็นก้อนของขนาดอนุภาคของดินซึ่งเหมาะแก่การนำมาใช้ขึ้นรูปของอิฐ สำหรับลักษณะของแกลบข้าวนั้นจะแสดงให้เห็นถึงตุ้มและหนามแหลมที่พบบนพื้นผิวของแกลบข้าวนันคือซิลิกาหรือควอทซ์ ซึ่งสอดคล้องกับผลวิเคาระห์องค์ประกอบทั้งทางเคมีและทางแร่ ส่วนขี้เลื่อยจะมีลักษณะที่มีรูพรุนคล้ายกับรังแตน และเศษหญ้ามีลักษณะเป็นเส้นและมีความพรุนตัวในตัวเอง



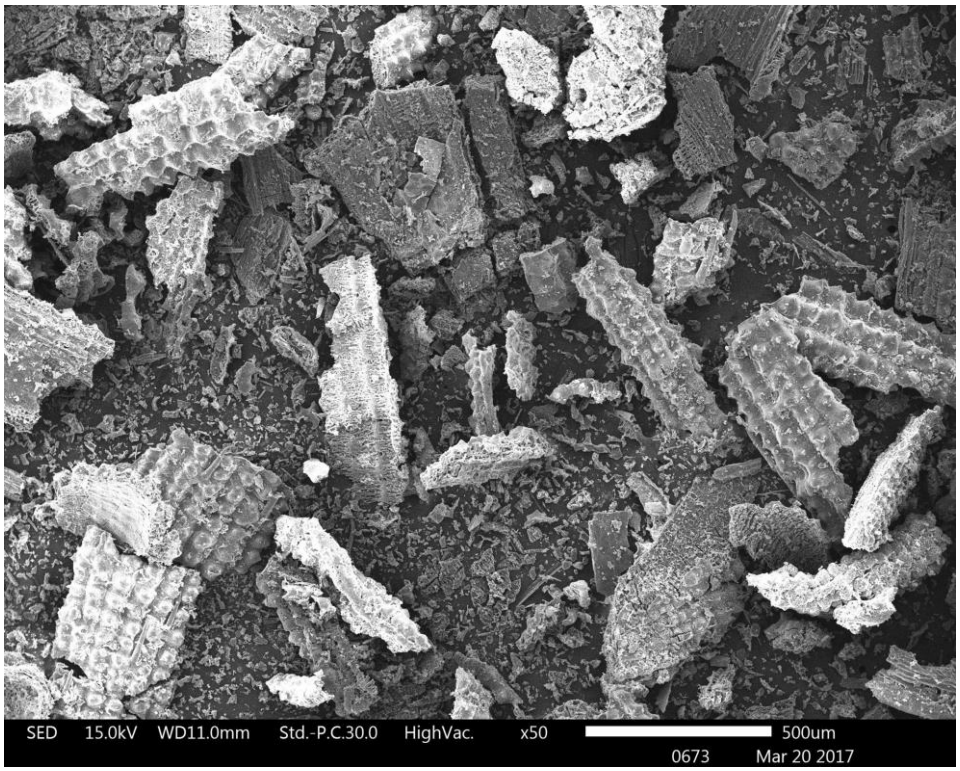
ภาพที่ 4.6 แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของดินด้วยเทคนิค SEM



ภาพที่ 4.7 แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของแกลบข้าวด้วยเทคนิค SEM



ภาพที่ 4.8 แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของขี้เลื่อยด้วยเทคนิค SEM



ภาพที่ 4.9 แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของเถ้าชานอ้อยด้วยเทคนิค SEM

4.5 สมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกล (Physical and mechanical properties)

จากผลการทดลองนำเศษวัสดุ คือ เถ้าชานอ้อย (Sugarcane bagasse ash) แกลบข้าว (Rice husk) และขี้เลื่อย (Sawdust) นำมาใช้เป็นส่วนผสมในการขึ้นรูปตัวอย่างอิฐทดลอง ที่อัตราส่วนผสม 0, 2.5, 5, 7.5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และเผาอิฐที่อุณหภูมิ 900, 1000 และ 1100 องศาเซลเซียส ผลจากการศึกษาคุณสมบัติเชิงกายภาพ และสมบัติเชิงกล ต่อลักษณะของรูพรุนที่เกิดขึ้นในโครงสร้างของอิฐ สามารถอภิปรายผลการทดลองได้ดังนี้

4.5.1 การหดตัวหลังการเผา (Fired shrinkage) โดยทั่วไปการหดตัวที่ใช้ในการสร้างอิฐดินเหนียวเกิดขึ้นเนื่องจากการระเหยของน้ำที่แทรกตัวอยู่ระหว่างอนุภาคดินเหนียวถ้าหากดินเหนียวมีขนาดอนุภาคที่ละเอียด เมื่อน้ำระเหยออกไปจะเกิดการหดตัวเป็นอย่างมาก และถ้าหากขนาดอนุภาคของดินมีขนาดอนุภาคโตการหดตัวก็จะน้อยกว่า โดยปกติคุณภาพที่ดีของการหดตัวของอิฐจะต้องต่ำกว่า 8 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ผลจากการใช้ตัวเติมก็จะส่งผลต่อการหดตัวของอิฐเช่นเดียวกันทั้งนี้ขนาดของอนุภาคของตัวเติมก็เป็นปัจจัยร่วมด้วย และอีกหนึ่งปัจจัยก็คือการขึ้นรูปของอิฐ โดยการขึ้นรูปด้วยวิธีการใช้เครื่องรีดจะทำให้ขนาดดินมีการอัดตัวแน่นกว่า ในขณะที่การขึ้นรูปด้วยวิธีการใช้แบบพิมพ์ไม้โดยการใช้แรงของคนขึ้นรูปจะทำให้การแพคตัวของดินไม่แน่นเท่ากับการใช้เครื่องสำหรับขึ้นรูป ผลจากทดลองใช้เศษวัสดุคือ เถ้าชานอ้อย (Sugarcane bagasse ash) เศษ แกลบข้าว (Rice husk) และขี้เลื่อย (Sawdust) เติมเป็นส่วนผสมในการทำอิฐที่อัตราส่วนผสม

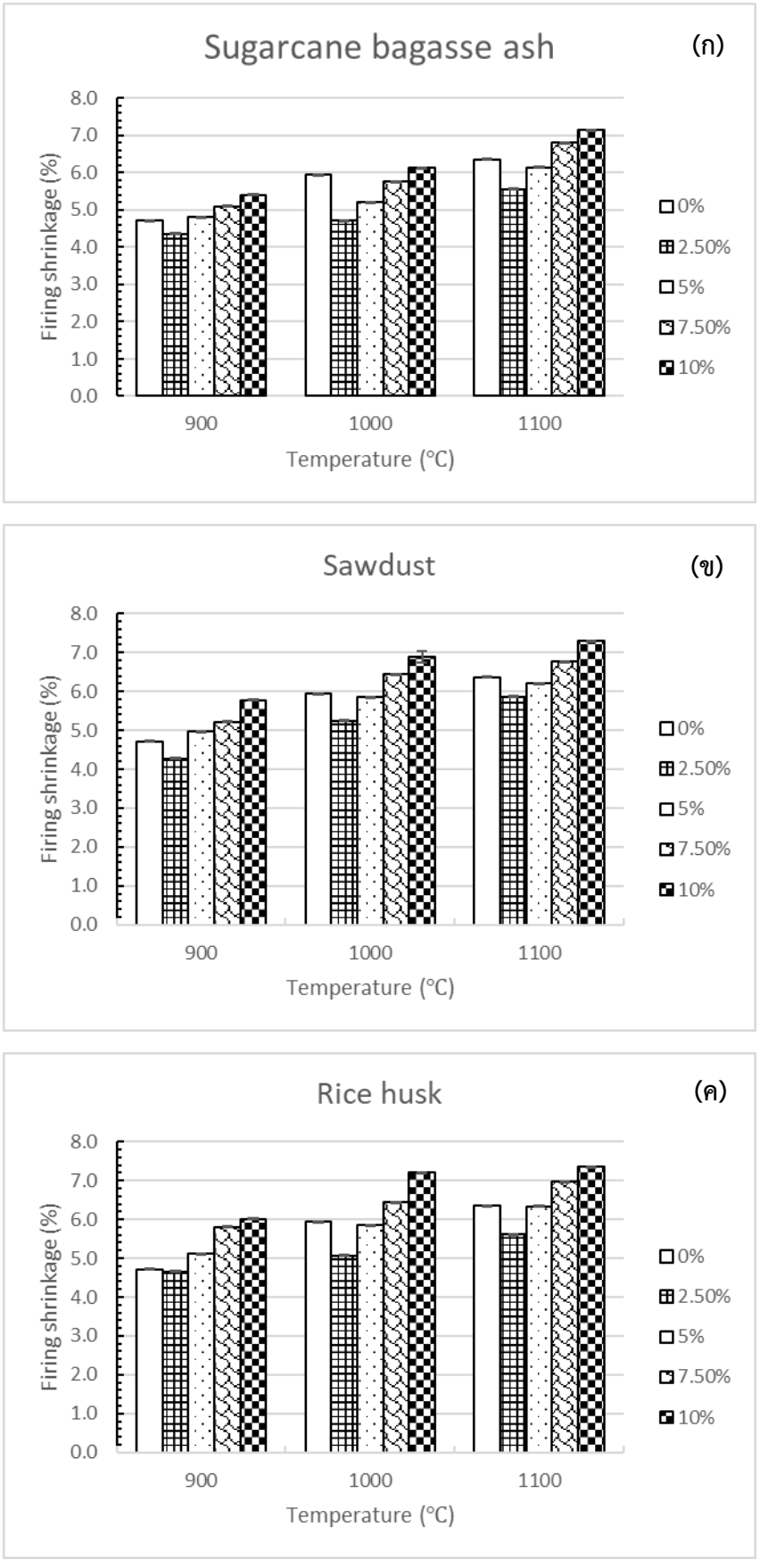
ระหว่าง 2.5-10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และเผาที่อุณหภูมิ 900-1100 องศาเซลเซียส พบว่าการหดตัวหลังการเผาของอิฐที่เติมเศษวัสดุชนิดต่างๆ อภิปรายผลดังนี้

เถ้าชานอ้อย (Sugarcane bagasse ash) พบว่าที่อุณหภูมิการเผาที่ 900 องศาเซลเซียส อิฐมีค่าการหดตัวอยู่ระหว่าง 4.36 % ถึง 5.41 % ในขณะที่อิฐเผาอุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส มีค่าการหดตัวตั้งแต่ 4.71 % จนถึง 6.12 % และอิฐที่เผาอุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส พบว่ามีค่าการหดตัวอยู่ระหว่าง 5.56 % ถึง 7.15 % ดังแสดงตามภาพที่ 4.10 (ก)

ขี้เลื่อย (Sawdust) พบว่าที่อุณหภูมิการเผาที่ 900 องศาเซลเซียส อิฐมีค่าการหดตัวอยู่ระหว่าง 4.27 % ถึง 5.77 % ในขณะที่อิฐเผาอุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส มีค่าการหดตัวตั้งแต่ 5.25 % จนถึง 6.9 % และอิฐที่เผาอุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส พบว่ามีค่าการหดตัวอยู่ระหว่าง 5.87 % ถึง 7.31 % ดังแสดงตามภาพที่ 4.10 (ข)

แกลบข้าว (Rice husk) พบว่าที่อุณหภูมิการเผาที่ 900 องศาเซลเซียส อิฐมีค่าการหดตัวอยู่ระหว่าง 4.66 % ถึง 6.02 % ในขณะที่อิฐเผาอุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส มีค่าการหดตัวตั้งแต่ 5.07 % จนถึง 7.21 % และอิฐที่เผาอุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส พบว่ามีค่าการหดตัวอยู่ระหว่าง 5.61 % ถึง 7.36 % ดังแสดงตามภาพที่ 4.10 (ค)

จากผลการทดลองใช้เศษวัสดุเป็นตัวเติมในส่วนผสมของอิฐช่วงอุณหภูมิการเผาจะส่งผลโดยตรงต่อลักษณะของอิฐหลังการเผาดังนี้ ที่อุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส มีการหดตัวเล็กน้อยเป็นผลเนื่องมาจากการเผาไหม้ของอินทรีย์สาร และการระเหยของน้ำ ช่วงอุณหภูมิ 500 - 700 องศาเซลเซียส อิฐเกิดการขยายตัว ที่อุณหภูมิ 700 -900 องศาเซลเซียส เกิดการหดตัวเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และช่วงอุณหภูมิจาก 900 - 1200 องศาเซลเซียส จะเกิดการหดตัวอย่างมาก ซึ่งเกิดจากการหลอมละลายของกลุ่มอัลคาไลน์ (Flux) ในส่วนประกอบของเนื้อดิน เช่น ไมกา (Mica) มัสโคไวท์ (Muscovite) และเหล็ก (Iron) เป็นต้น ซึ่งที่ช่วงอุณหภูมิ 900 – 950 องศาเซลเซียส จะเกิดการเผาไหม้ของอินทรีย์สาร (Carbon) ในเนื้อดินถูกเผาไหม้หมดและพวกคาร์บอนไดออกไซด์จะสลายตัวที่อุณหภูมิ 825 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิ 980 องศาเซลเซียส ดินเริ่มเปลี่ยนโครงสร้าง และเกิดการหดตัวจากการเริ่มหลอมละลายของกลุ่มอัลคาไลน์ ในเนื้อดินเริ่มหลอมละลายที่ช่วงอุณหภูมิ 1050 – 1100 องศาเซลเซียส เกิดเป็นโครงสร้างผลึกมัลไลต์รูปเข็มประสานกันในเนื้อดิน ช่วงนี้เป็นช่วงที่เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี เช่นการเปลี่ยนจากดินเป็นมัลไลต์ หรือเกิดการหลอมของสารช่วยหลอม (เฟลด์สปาร์) หรือสิ่งเจือปนอื่นๆ แล้วเหนี่ยวนำให้เกิดการสุกตัว ขณะเดียวกันอิฐจะเกิดการหดตัวจนอิฐมีความแน่นตัว แลความพรุนตัวของอิฐจะน้อยลง ซึ่งจะมีผลโดยตรงต่อความแข็งแรงของอิฐ



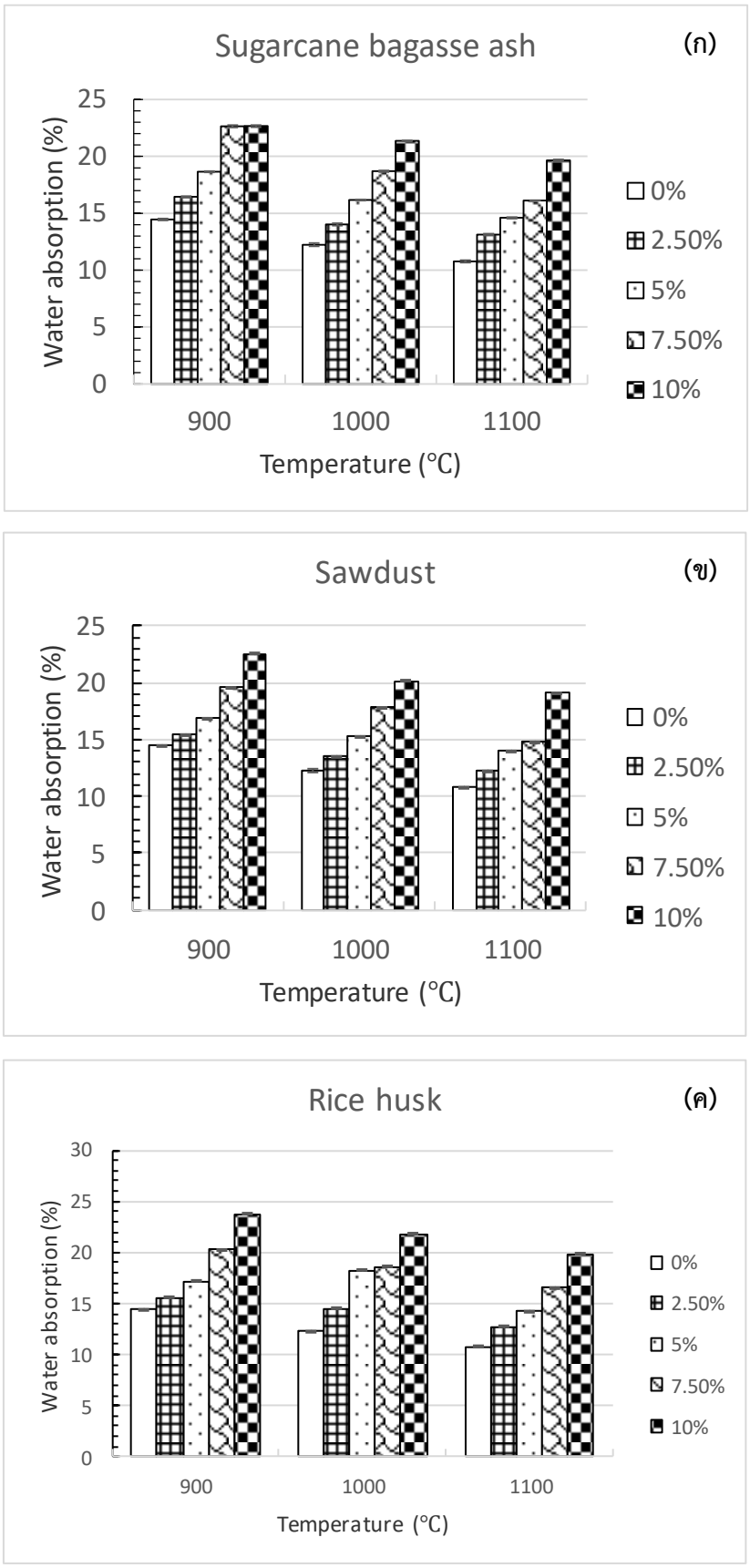
ภาพที่ 4.10 แสดงการหดตัวหลังการเผาที่อุณหภูมิ 900-1100 องศาเซลเซียส

4.5.2 การดูดซึมน้ำและความพรุนตัว (Water absorption and apparent porosity) การดูดซึมน้ำและความพรุนตัวของอิฐ เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อความทนทานของก้อนอิฐและวัดความพรุนตัวของอิฐ ดังนั้นโครงสร้างภายในของอิฐจะต้องหนาแน่นมากพอที่จะป้องกันไม่ให้น้ำซึมผ่านได้ในปริมาณมากกว่าที่มาตรฐานได้กำหนดเอาไว้ เพื่อเพิ่มความหนาแน่นและลดการดูดซึมน้ำ อุณหภูมิในการเผาเป็นปัจจัยที่ส่งผลโดยตรงต่ออิฐ อิฐก่อสร้างส่วนใหญ่ควรมีอัตราการดูดซึมน้ำต่ำเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการสะสมของสิ่งสกปรก โดยเฉพาะอิฐก่อสร้างที่ต้องใช้ในอาคารหรืออิฐที่ตกแต่งภายใน รวมถึงการใช้งานด้านการก่อสร้างใต้ดินหรือใกล้แหล่งน้ำ ผลการศึกษาการใช้เศษวัสดุเป็นตัวเติมชนิดต่างๆ ที่ผสมในอิฐ คือ เถ้าชานอ้อย ขี้เลื่อย และแกลบข้าว พบว่าตัวเติมแต่ละชนิดมีผลโดยตรงต่อลักษณะของรูพรุนที่เกิดขึ้นในโครงสร้างของเนื้ออิฐและส่งผลโดยตรงต่อค่าการดูดซึมน้ำของอิฐ นอกจากนี้ยังพบว่าอุณหภูมิในการเผาอิฐนั้นก็มีผลโดดยตรงเช่นกันต่อค่าการดูดซึมน้ำ คือเมื่ออุณหภูมิในการเผาสูงขึ้นจาก 900 ไปจนถึง 1100 องศาเซลเซียสจะเป็นผลทำให้ค่าดูดซึมน้ำต่ำลง ผลจากการทดลองพบว่า

เถ้าชานอ้อย (Sugarcane bagasse ash) อุณหภูมิการเผาที่ 900 องศาเซลเซียส อิฐมีค่าการดูดซึมน้ำอยู่ระหว่าง 16.4 % ถึง 22.7 % ในขณะที่อิฐเผาอุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส มีค่าการดูดซึมน้ำตั้งแต่ 14 % จนถึง 21.4 % และอิฐที่เผาอุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส มีค่าการดูดซึมน้ำอยู่ระหว่าง 13.1 % ถึง 19.6 % ดังแสดงตามภาพที่ 4.11 (ก)

ขี้เลื่อย (Sawdust) อุณหภูมิการเผาที่ 900 องศาเซลเซียส อิฐมีค่าการดูดซึมน้ำอยู่ระหว่าง 15.4 % ถึง 22.5 % ในขณะที่อิฐเผาอุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส มีค่าการดูดซึมน้ำตั้งแต่ 13.5 % จนถึง 20.1 % และอิฐที่เผาอุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส มีค่าการดูดซึมน้ำอยู่ระหว่าง 12.3 % ถึง 19.1 % ดังแสดงตามภาพที่ 4.11 (ข)

แกลบข้าว (Rice husk) อุณหภูมิการเผาที่ 900 องศาเซลเซียส อิฐมีค่าการดูดซึมน้ำอยู่ระหว่าง 15.6 % ถึง 23.7 % ในขณะที่อิฐเผาอุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส มีค่าการดูดซึมน้ำตั้งแต่ 14.5 % จนถึง 21.8 % และอิฐที่เผาอุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส มีค่าการดูดซึมน้ำอยู่ระหว่าง 12.7 % ถึง 19.8 % ดังแสดงตามภาพที่ 4.11 (ค)



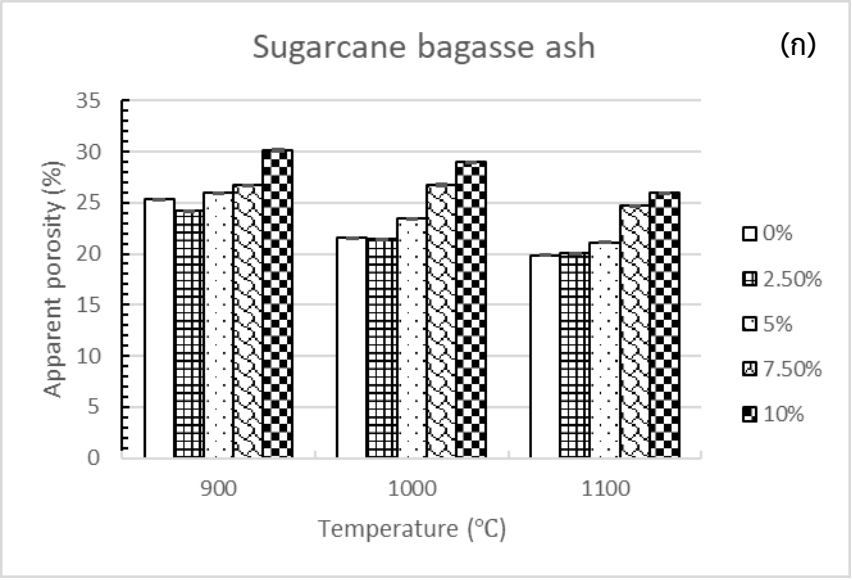
ภาพที่ 4.11 แสดงค่าการดูดซึมน้ำเผาที่อุณหภูมิ 900-1100 องศาเซลเซียส

การดูดซึมน้ำของอิฐเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความพรุนตัวอย่างชัดเจน ดังนั้นแนวโน้มที่คล้ายกันพบในการดูดซึมน้ำและความพรุนตัว (Porosity) ความพรุนที่เพิ่มขึ้นในเนื้ออิฐ ทำให้ความหนาแน่นและค่าความแข็งแรงของอิฐลดลง ผลการศึกษาค่าความพรุนตัวของอิฐ เมื่อมีการเพิ่มอัตราส่วนของตัวเติมคือ เถ้าชานอ้อย ขี้เลื่อย และแกลบข้าว พบว่าความพรุนตัวของอิฐจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณสัดส่วนของตัวเติม ตั้งแต่ 2.5-10 % ผลการศึกษาแสดงค่าความพรุนตัวของอิฐจากการเติมเศษวัสดุชนิดต่างๆ ดังนี้

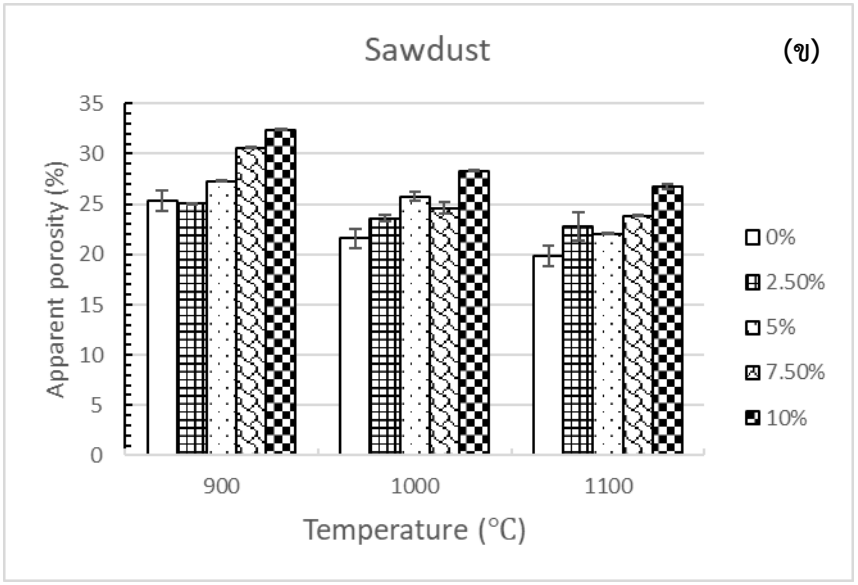
เถ้าชานอ้อย (Sugarcane bagasse ash) อุณหภูมิการเผาที่ 900 องศาเซลเซียส อิฐมีค่าความพรุนตัวอยู่ระหว่าง 24.2 % ถึง 30.1 % ในขณะที่อิฐเผาอุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส มีค่าความพรุนตัวตั้งแต่ 21.5 % จนถึง 29 % และอิฐที่เผาอุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส มีค่าความพรุนตัวอยู่ระหว่าง 20.1 % ถึง 26 % ดังแสดงตามภาพที่ 4.12 (ก)

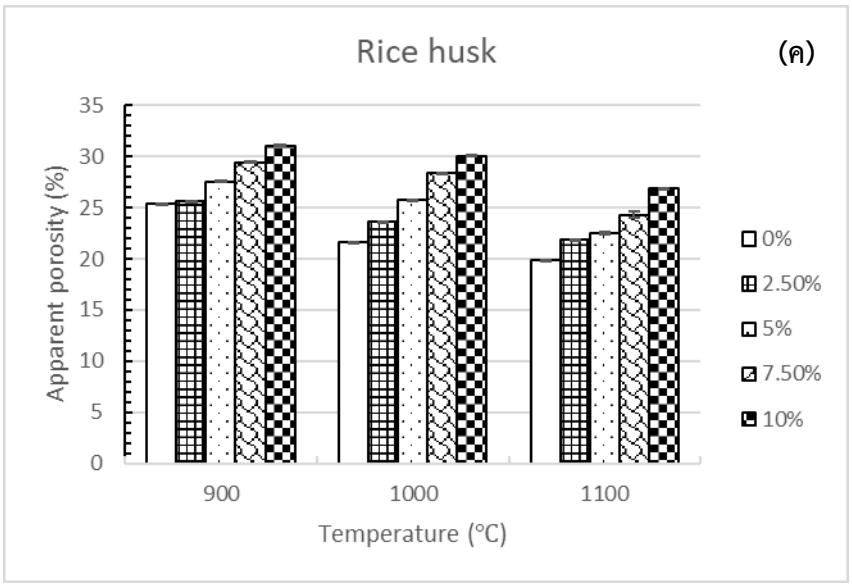
ขี้เลื่อย (Sawdust) อุณหภูมิการเผาที่ 900 องศาเซลเซียส อิฐมีค่าความพรุนตัวอยู่ระหว่าง 25 % ถึง 32.4 % ในขณะที่อิฐเผาอุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส มีค่าความพรุนตัวตั้งแต่ 23.6 % จนถึง 28.3 % และอิฐที่เผาอุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส มีค่าความพรุนตัวอยู่ระหว่าง 22.8 % ถึง 26.8 % ดังแสดงตามภาพที่ 4.12 (ข)

แกลบข้าว (Rice husk) อุณหภูมิการเผาที่ 900 องศาเซลเซียส อิฐมีค่าความพรุนตัวอยู่ระหว่าง 25.6 % ถึง 31.1 % ในขณะที่อิฐเผาอุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส มีค่าความพรุนตัวตั้งแต่ 23.6 % จนถึง 30.1 % และอิฐที่เผาอุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส มีค่าความพรุนตัวอยู่ระหว่าง 21.9 % ถึง 26.9 % ดังแสดงตามภาพที่ 4.12 (ค)



ภาพที่ 4.12 แสดงค่าความพรุนตัวของอิฐเผาที่อุณหภูมิ 900-1100 องศาเซลเซียส





ภาพที่ 4.12 (ต่อ)

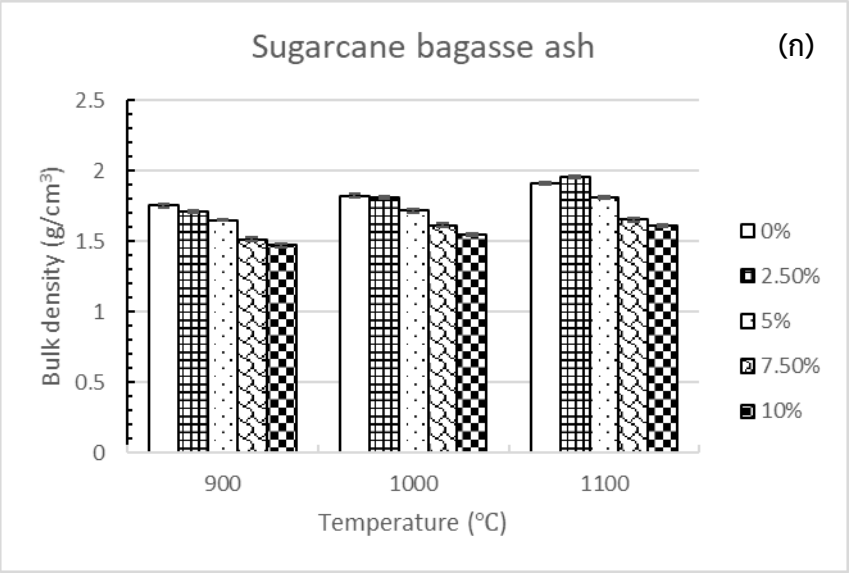
4.5.3 ความหนาแน่น (Bulk density) ความหนาแน่นของดินอิฐขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ซึ่งเป็นผลเฉพาะเจาะจงของวัตถุดิบที่ใช้วิธีการของการผลิตและอุณหภูมิของการเผาไหม้ ความหนาแน่นของอิฐดินเหนียวลดลงค่าความแข็งแรงก็จะลดลงในขณะที่ค่าดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น ช่วงกลางของการสุกตัว (Middle stage) เป็นช่วงที่มีการขยายพื้นที่กว้างขึ้นทำให้บริเวณที่อนุภาคชิดกันขยายกว้างมากขึ้นหรือที่เรียกว่าเกรน (Grain) จนขยายไปถึงอนุภาคดินที่อยู่ข้างเคียงโดยเรียกบริเวณที่อนุภาคชิดกันกันว่าขอบเกรน (Grain boundary) และอิฐมีการหดตัวมากขึ้นพร้อมๆ กับเริ่มหลอมละลายของสารบางตัวหรือตัวช่วยหลอมจนทำให้ช่องว่างเริ่มลดลงพร้อมๆ กับการขยายขอบเกรนมากขึ้น และช่วงท้ายของการสุกตัว (Last stage) เป็นช่วงอนุภาคชิดกันมากขึ้นละขอบเกรนขยายพื้นที่มากจนได้เกรนโตขึ้น (Grain growth) และอิฐมีการหดตัวมากขึ้นจนกระทั่งช่องว่างในอิฐลดลงน้อยลงและหมดไปในที่สุดพร้อมๆ กับการเกิดมัลไลต์ทำให้ได้อิฐที่มีความแข็งแรงสูง ความพรุนตัวน้อย และมีความหนาแน่นสูง ดังนั้นการทดสอบหาค่าความหนาแน่นของอิฐจึงเป็นปัจจัยที่สำคัญอย่างหนึ่งในการทดสอบคุณมสมบัติของอิฐมอญ ผลจากการศึกษาความหนาแน่นของอิฐเป็นสัดส่วนผกผันกับ

ปริมาณของตัวเติมที่เพิ่มขึ้นในส่วนผสมของอิฐ นอกจากนั้นความหนาแน่นของอิฐลดลงเป็นผลมาจากการเพิ่มในปริมาณที่สูงขึ้น ตั้งแต่ 2.5-10 % ในขณะที่ความหนาแน่นของอิฐที่เพิ่มขึ้นร่วมกับการเผาอุณหภูมิสูงเป็นผลให้ความพรุนตัวลดน้อยลง ซึ่งผลจากการทดลองพบว่า ความหนาแน่นโดยรวม (Bulk density) ของอิฐหลังการเผาที่อุณหภูมิ 900-1100 องศาเซลเซียส ผลจากการใช้ตัวเติมชนิดต่างๆ ที่ส่งผลต่อความหนาแน่นของอิฐหลังการเผาเป็นดังนี้

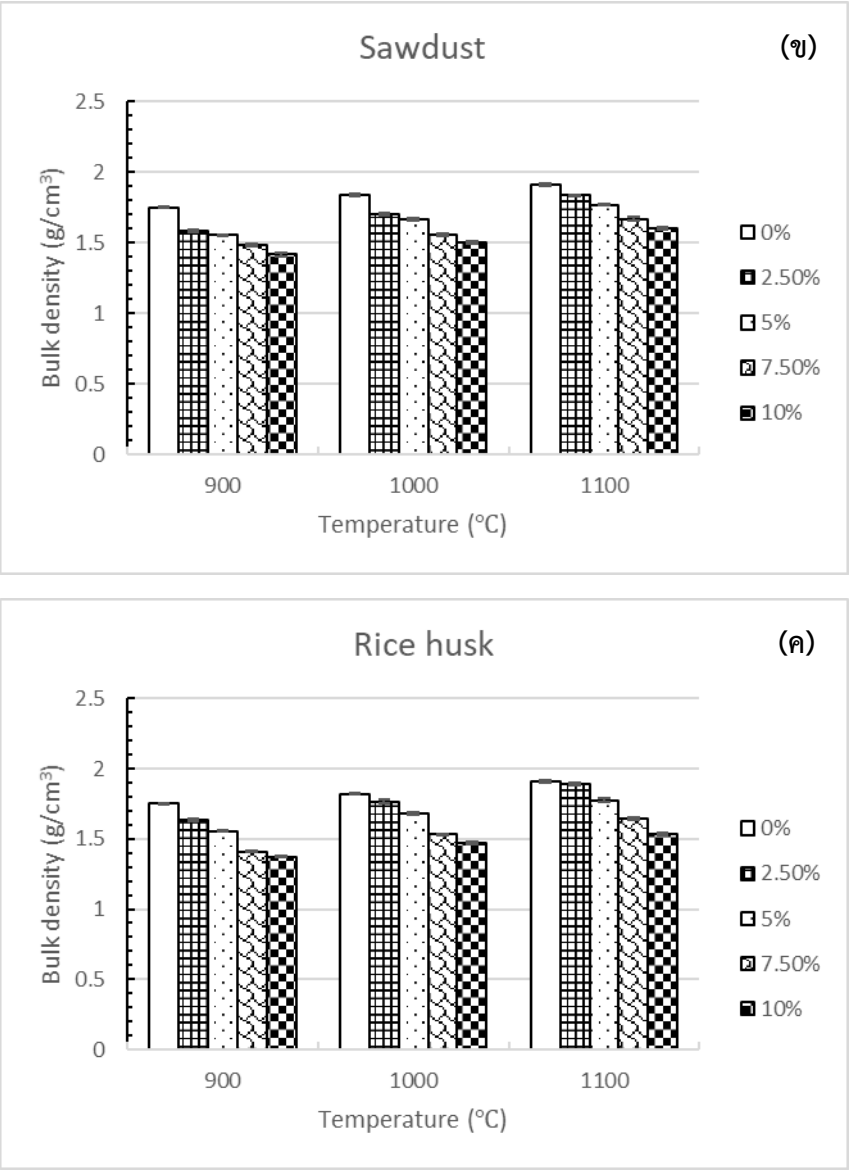
เถ้าชานอ้อย (Sugarcane bagasse ash) อุณหภูมิการเผาที่ 900 องศาเซลเซียส อิฐมีค่าความหนาแน่นอยู่ระหว่าง 1.71 g/cm^3 ถึง 1.47 g/cm^3 ในขณะที่อิฐเผาอุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส มีค่าความหนาแน่นตั้งแต่ 1.80 g/cm^3 ถึง 1.54 g/cm^3 และอิฐที่เผาอุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส มีค่าความหนาแน่นตัวอยู่ระหว่าง 1.95 g/cm^3 ถึง 1.60 g/cm^3 ดังแสดงตามภาพที่ 4.13 (ก)

ขี้เลื่อย (Sawdust) อุณหภูมิการเผาที่ 900 องศาเซลเซียส อิฐมีค่าความหนาแน่นอยู่ระหว่าง 1.60 g/cm^3 ถึง 1.41 g/cm^3 ในขณะที่อิฐเผาอุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส มีค่าความหนาแน่นตั้งแต่ 1.70 g/cm^3 ถึง 1.50 g/cm^3 และอิฐที่เผาอุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส มีค่าความหนาแน่นอยู่ระหว่าง 1.83 g/cm^3 ถึง 1.60 g/cm^3 ดังแสดงตามภาพที่ 4.13 (ข)

แกลบข้าว (Rice husk) อุณหภูมิการเผาที่ 900 องศาเซลเซียส อิฐมีค่าความหนาแน่นอยู่ระหว่าง 1.63 g/cm^3 ถึง 1.37 g/cm^3 ในขณะที่อิฐเผาอุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส มีค่าความหนาแน่นตั้งแต่ 1.76 g/cm^3 ถึง 1.47 g/cm^3 และอิฐที่เผาอุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส มีค่าความหนาแน่นอยู่ระหว่าง 1.89 g/cm^3 ถึง 1.53 g/cm^3 ดังแสดงตามภาพที่ 4.13 (ค)



ภาพที่ 4.13 แสดงค่าความหนาแน่นของอิฐเผาที่อุณหภูมิ 900-1100 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 4.13 (ต่อ)

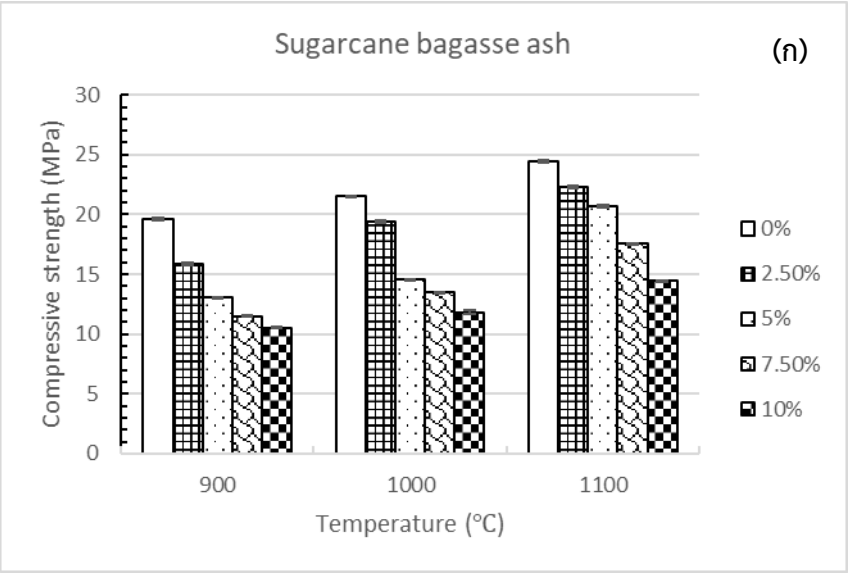
4.5.4 ค่าความแข็งแรง (Compressive strength) ค่าความแข็งแรงของอิฐแสดงถึงดัชนีชี้วัดที่สำคัญหรับวัสดุก่อสร้าง ตามมาตรฐานของมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก. 2545-77) ได้กำหนดค่าความแข็งแรงของอิฐก่อสร้างไว้คือ 3.5 เมกะปาสคาล (MPa) ในการศึกษานี้พบว่าค่าความแข็งของอิฐเป็นผลโดยตรงกับปริมาณของตัวเติม (เถ้าชานอ้อย ขี้เลื่อย และแกลบข้าว) อุณหภูมิในการเผาอิฐ ค่าความแข็งแรงของอิฐจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการเผาเพิ่มสูงขึ้น การลดลงของค่าความแข็งแรงของอิฐเป็นผลมาจากความพรุนตัว (Porosity) ที่เพิ่มขึ้นในเนื้ออิฐซึ่งเป็นผลมาจากปริมาณของตัวเติมที่เพิ่มสูงขึ้น และจะส่งผลให้ความหนาแน่น (Density) ของอิฐลดลงด้วยเช่นกัน ผลจากการทดลองใช้ตัวเติมเป็นส่วนผสมในการทำอิฐเพื่อศึกษาผลของตัวเติมต่อสมบัติเชิงกลของอิฐพบว่า

เถ้าชานอ้อย (Sugarcane bagasse ash) อุณหภูมิการเผาที่ 900 องศาเซลเซียส อิฐมีค่าความแข็งแรงอยู่ระหว่าง 15.9 MPa ถึง 10.5 MPa ในขณะที่อิฐเผาอุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส มีค่าความ

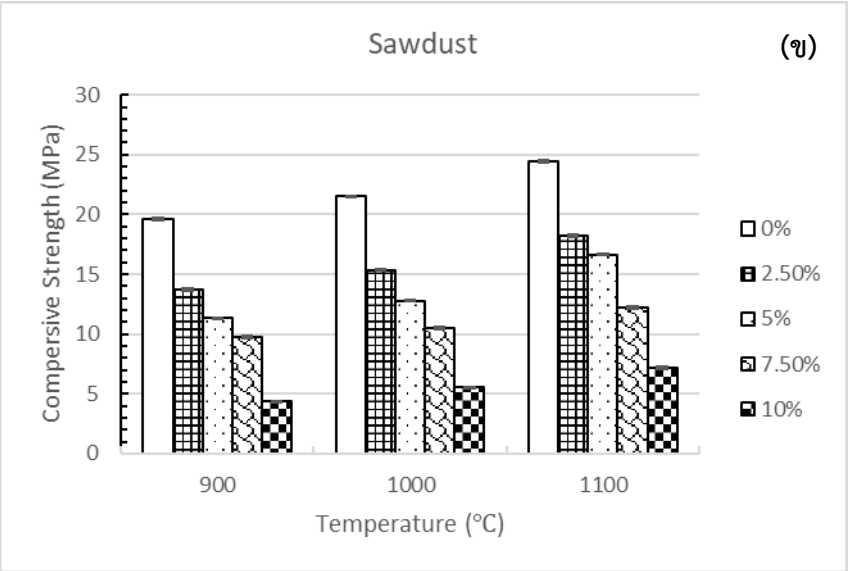
แข็งแรงตั้งแต่ 19.4 MPa ถึง 11.8 MPa และอิฐที่เผาอุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส มีค่าความแข็งแรงอยู่ระหว่าง 22.3 MPa ถึง 14.5 MPa ดังแสดงตามภาพที่ 4.14 (ก)

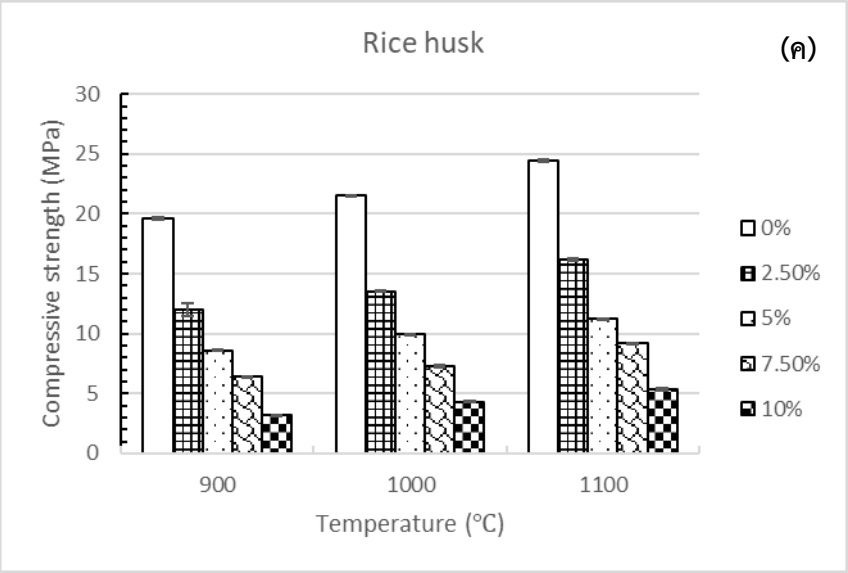
ขี้เลื่อย (Sawdust) อุณหภูมิการเผาที่ 900 องศาเซลเซียส อิฐมีค่าความแข็งแรงอยู่ระหว่าง 13.7 MPa ถึง 4.35 MPa ในขณะที่อิฐเผาอุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส มีค่าความแข็งแรงตั้งแต่ 15.4 MPa ถึง 5.52 MPa และอิฐที่เผาอุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส มีค่าความแข็งแรงอยู่ระหว่าง 18.2 MPa ถึง 7.17 MPa ดังแสดงตามภาพที่ 4.14 (ข)

แกลบข้าว (Rice husk) อุณหภูมิการเผาที่ 900 องศาเซลเซียส อิฐมีค่าความแข็งแรงอยู่ระหว่าง 12 MPa ถึง 3.17 MPa ในขณะที่อิฐเผาอุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส มีค่าความแข็งแรงตั้งแต่ 13.6 MPa ถึง 4.31 MPa และอิฐที่เผาอุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส มีค่าความแข็งแรงอยู่ระหว่าง 16.2 MPa ถึง 5.35 MPa ดังแสดงตามภาพที่ 4.14 (ค)



ภาพที่ 4.14 แสดงค่าความแข็งแรงของอิฐเผาที่อุณหภูมิ 900-1100 องศาเซลเซียส





ภาพที่ 4.14 (ต่อ)

4.6 ทดสอบค่าการนำความร้อนของอิฐ (Thermal conductivity of clay bricks)

ค่าการนำความร้อน หรือสัมปะสิทธิ์การนำความร้อน เป็นสมบัติเชิงความร้อน (Thermal properties) ของวัสดุที่บ่งถึงอัตราเร็วของการส่งผ่านพลังงานความร้อนโดยการนำความร้อน (Conduction) ของสารต่างๆ ซึ่งเป็นการส่งผ่านความร้อนภายในโมเลกุลของสาร จากโมเลกุลที่มีระดับพลังงานสูงกว่า ไปยังระดับที่ต่ำกว่า จากการทดลองใช้เศษวัสดุคือ เถ้าชานอ้อย ขี้เลื่อย และแกลบข้าว ที่อัตราส่วนผสม 0, 2.5, 5, 7.5 และ 10 เปอร์เซ็นโดยน้ำหนัก เผาที่อุณหภูมิ 900-1100 องศาเซลเซียส ผลจากการทดลองค่าการนำความร้อนของอิฐอภิปรายผลได้ดังนี้

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อนและค่าความพรุนตัวของอิฐที่ใช้เศษวัสดุเป็นส่วนผสมในการผลิตอิฐเป็นผลมาจากปริมาณของตัวเติม (เถ้าชานอ้อย ขี้เลื่อย และแกลบข้าว) ซึ่งความพรุนตัวเกิดขึ้นระหว่างการเผาไหม้ของอิฐจึงเป็นสาเหตุทำให้เกิดเป็นโพรงหรือรูพรุนขึ้นในโครงสร้างของเนื้ออิฐในลักษณะของรูพรุนตัว

ปรากฏที่กระจายทั่วทั้งบริเวณในก้อนอิฐ ดังนั้นรูพรุนทีเกิดขึ้นจากตัวเติมคือเศษวัสดุดังกล่าวก็จะส่งผลโดยตรงในด้านสมบัติทางกายภาพ และเชิงกล เช่น ปริมาณการดูดซึมน้ำสูงขึ้น ค่าความหนาแน่นลดลง รวมทั้งค่าความแข็งแรงของอิฐด้วยเช่นกัน ในขณะที่รูพรุนนี้เองที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ก็จะส่งผลในแง่ของค่าการนำความร้อนของอิฐ อิฐที่มีขนาดรูพรุน ขนาดเล็กกว่าจะนำความร้อนได้น้อย ผลจากการทดลองค่าการนำความร้อนของอิฐจากการเติม เถ้าชานอ้อย ขี้เลื่อย และแกลบข้าว ได้แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าความพรุนต่อค่าการนำความร้อนได้ดังนี้

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าความพรุนตัวต่อค่าการนำความร้อนของอิฐจากการใช้เถ้าชานอ้อยเป็นส่วนผสมเผาที่อุณหภูมิ 900-1100 องศาเซลเซียส

ดินผสมกับเถ้าชานอ้อย (wt.%)	**ค่าความพรุนตัว (%)***	**ค่าการนำความร้อน (*k*)****	**ค่าความพรุนตัว (%)**	**ค่าการนำความร้อน (*k*)**	**ค่าความพรุนตัว (%)**	**ค่าการนำความร้อน (*k*)**
	900 องศาเซลเซียส		**1000 องศาเซลเซียส**		**1100 องศาเซลเซียส**	
0	25.3	0.64	21.6	0.78	19.9	0.96
2.5	24.2	0.58	21.5	0.76	20.1	0.84
5	26	0.52	23.5	0.69	21.1	0.77
7.5	26	0.43	26.8	0.60	24.7	0.63
10	30.1	0.31	29	0.47	26	0.56

***** ค่าการความพรุนตัว (Porosity, %)

****** ค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity, W/mK)

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าความพรุนตัวต่อค่าการนำความร้อนของอิฐจากการใช้ขี้เลื่อยเป็นส่วนผสมเผาที่อุณหภูมิ 900-1100 องศาเซลเซียส

ดินผสมกับเถ้าชานอ้อย (wt.%)	**ค่าความพรุนตัว (%)***	**ค่าการนำความร้อน (*k*)****	**ค่าความพรุนตัว (%)**	**ค่าการนำความร้อน (*k*)**	**ค่าความพรุนตัว (%)**	**ค่าการนำความร้อน (*k*)**
	900 องศาเซลเซียส		**1000 องศาเซลเซียส**		**1100 องศาเซลเซียส**	
0	25.3	0.64	21.6	0.78	19.9	0.96
2.5	25	0.44	23.6	0.53	22.8	0.62
5	27.3	0.37	25.8	0.48	22	0.58
7.5	30.6	0.29	24.6	0.41	23.8	0.51
10	32.4	0.18	28.3	0.36	26.8	0.49

***** ค่าการความพรุนตัว (Porosity, %)

****** ค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity, W/mK)

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าความพรุนตัวต่อค่าการนำความร้อนของอิฐจากการใช้แกลบข้าวเป็นส่วนผสมเผาที่อุณหภูมิ 900-1100 องศาเซลเซียส

ดินผสมกับเถ้าชานอ้อย (wt.%)	**ค่าความพรุนตัว (%)***	**ค่าการนำความร้อน (*k*)****	**ค่าความพรุนตัว (%)**	**ค่าการนำความร้อน (*k*)**	**ค่าความพรุนตัว (%)**	**ค่าการนำความร้อน (*k*)**
	900 องศาเซลเซียส		**1000 องศาเซลเซียส**		**1100 องศาเซลเซียส**	
0	25.3	0.64	21.6	0.78	19.9	0.96
2.5	25.4	0.38	23.6	0.47	21.9	0.55
5	27.5	0.31	25.7	0.38	22.5	0.49
7.5	29.4	0.23	28.3	0.29	24.3	0.36
10	31.1	0.16	30.1	0.18	26.9	0.25

***** ค่าการความพรุนตัว (Porosity, %)

****** ค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity, W/mK)

ผลจากการศึกษาค่าการนำความร้อนของอิฐโดยการใช้เศษวัสดุเป็นส่วนผสมในการทำอิฐคือ เถ้าชานอ้อย ขี้เลื่อย และแกลบข้าว เผาที่อุณหภูมิ 900-1100 องศาเซลเซียส พบว่าค่าการนำความร้อนจากการใช้เศษวัสดุทั้ง 3 ประเภทนั้นจะให้ค่าการนำความร้อนที่แตกต่างกันออกไปทั้งขึ้นอยู่กับปริมาณของตัวเติมและลักษณะของรูพรุนที่เกิดขึ้นหลังการเผา ซึ่งการทดลองนี้จะเห็นได้ว่าอิฐที่ใช้ขี้เลื่อย และแกลบข้าว เป็นส่วนผสมที่ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักนั้น จะให้ค่าการนำความร้อนที่ต่ำคือ 0.18 W/mK และ 0.16 W/mK ในขณะที่อิฐที่ใช้เถ้าชานอ้อยเป็นส่วนผสม ค่าการนำความร้อนเท่ากับ 0.31 W/mK จากการเติมเถ้าชานอ้อยที่ 10 เปอร์เซ็ฯโดยน้ำหนัก ในขณะที่อิฐที่ไม่มีการเติมตัวเติมใดๆ พบว่าค่าการนำความร้อนอยู่ระหว่าง 0.84-0.96 W/mK อย่างไรก็ตามจากความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนตัวและค่าการนำความร้อน ในการนำอิฐไปใช้งานยังคงต้องคำนึงถึงค่าความแข็งแรง และความทนทานของอิฐด้วย เพราะการเลือกอิฐนำไปใช้งานนั้นจะต้องอ้างอิงตามมารตฐานที่ได้กำหนดเอาไว้ตามมาตรฐาน มอก 77-2545 ว่าด้วยเรื่องอิฐสามัญก่อสร้าง

สรุปผลจากการทดลองครั้งนี้พบว่าการลดลงของค่าการนำความร้อนเป็นผลมาจากความพรุนตัวที่เพิ่มขึ้นในเนื้ออิฐ ทั้งนี้การนำไปใช้งานต้องคำนึงถึงสมบัติทางด้านกายภาพ และเชิงกล เนื่องจากจะได้เลือกนำไปใช้งานได้อย่างเหมาะสม เช่น ความคงทน (Durability) ความคงทนต่อสภาวะอากาศ น้ำ ลม สภาพความเป็นกรด-ด่างของอิฐเป็นสิ่งสำคัญ เนื่องจากอิฐถูกนำไปใช้ในการก่อสร้างที่จะต้องสัมผัสกับสภาพแวดล้อมโดยตรง เช่น พื้นถนน กำแพง การบุผนังภายนอกอาคาร การก่อสร้างที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นการยึดเกาะ การฉาบปูนซีเมนต์ ซึ่งปูนซีเมนต์นี้มีสภาพความเป็นด่าง ทำให้อิฐก่อสร้างต้องสามารถทนต่อสภาพด่างได้ หรือแม้แต่การใช้อิฐก่อสร้างบุผนังหรือปูพื้นในห้องปฏิบัติการเคมี เป็นต้น ความแข็งแรงต่อแรงอัด (Compressive strength) อิฐก่อสร้างส่วนใหญ่ต้องการความแข็งแรงอัดสูง เพื่อให้สามารถใช้งานกับสิ่งปลูกสร้างที่ต้องรับน้ำหนักมาก เช่น เขื่อน สะพาน ถนน อาคารสูง และการดูดซึมน้ำ (Water absorption) โดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้อิฐก่อสร้างในสภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอยู่เสมอ ผลจากค่าความพรุนตัวนั้นถ้าหากอิฐสามารถลดการนำความร้อนเข้าสู่ตัวอาคารได้จะใช้ให้ประหยัดพลังงานได้เป็นอย่างมาก รวมทั้งเป็นการใช้ประโยชน์จากการนำเศษวัสดุที่เหลือทิ้งที่มีอยู่ในท้องถิ่น อีกทั้งยังช่วยลดต้นทุนในการผลิตอิฐ และยังเป็นแนวทางสำหรับกระบวนการผลิตอิฐที่มีน้ำหนักเบา ประหยัดพลังงานได้อีกทาง

4.7 ลักษณะพื้นผิวของอิฐ

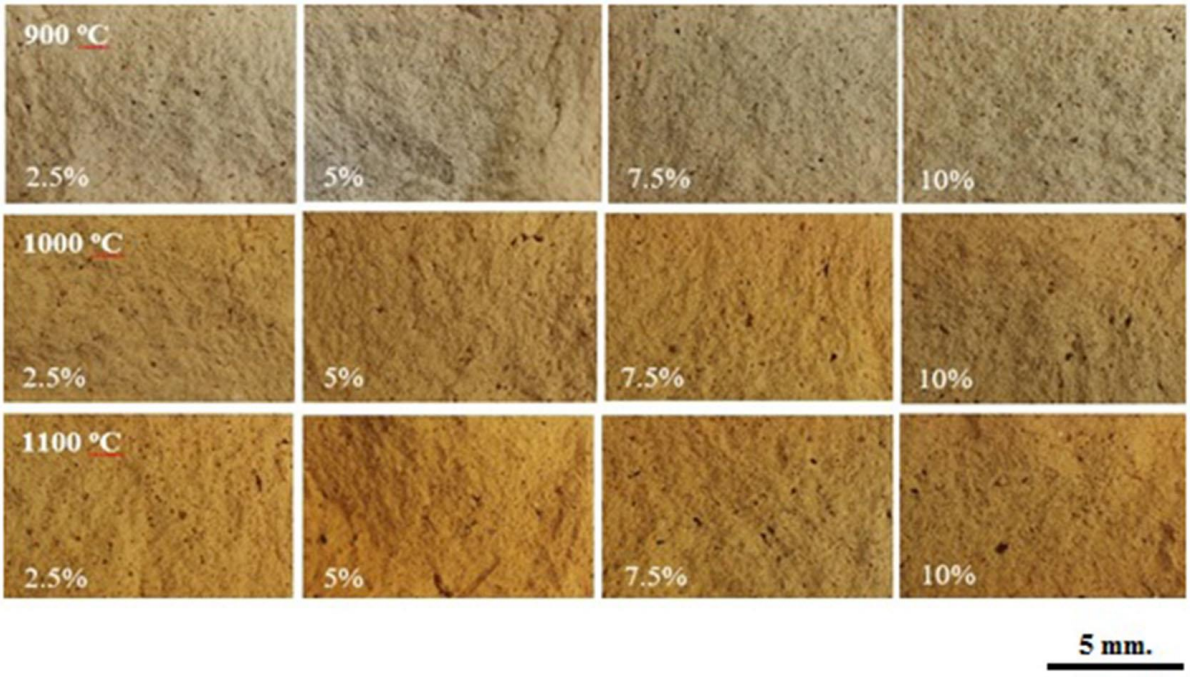
จากการศึกษาลักษณะของรูพรุนที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของอิฐ จากการเติมเศษวัสดุได้แก่ เถ้าชานอ้อย ขี้เลื่อย และแกลบข้าวนำมาผสมในอัตราส่วนผสมคือ 2.5, 5, 7.5 และ 10 เปอร์เซ็นโดยน้ำหนัก จากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิ 900-1100 องศาเซลเซียส หลังการเผาบพว่า ปริมาณของรูพรุนที่เกิดขึ้นในเนื้ออิฐจะเพิ่มมากขึ้นตามอัตราส่วนของเศษวัสดุ จึงทำให้ผลทางกายภาพของอิฐ เช่น ปริมาณการดูดซึมน้ำ (Water Absorption) ความพรุนตัว (Porosity) ของอิฐเพิ่มสูงขึ้น (สอดคล้องกับการศึกษาสมบัติทางกายภาพและเชิงกลในหัวข้อที่ 4.5) ในขณะที่ความหนาแน่น (Density) และความแข็งแรง (Strength) ของอิฐลดลง ซึ่งผลจากความพรุนตัวที่พบในอิฐนี้อาจส่งผลโดยตรงต่อค่าการนำความร้อนของอิฐ โดยค่าความพรุนตัวจะแปรผกผันกับค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) รูพรุน (Pore) หรือช่องว่างอากาศ (Air space) ในเนื้อวัตถุ แบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ รูพรุน เปิด (Opened or unsealed pores) และรูพรุนปิด (Closed or sealed pores) โดยที่รูพรุนเปิดจะมีส่วนหนึ่งต่อกันผิววัตถุได้

ความพรุนตัว (Porosity) ของวัตถุเป็นอัตราส่วนของช่องว่างอากาศที่มีอยู่ระหว่างอนุภาคของของแข็งในวัตถุต่อปริมาตรวัตถุ ความพรุนมี 2 ชนิดคือ

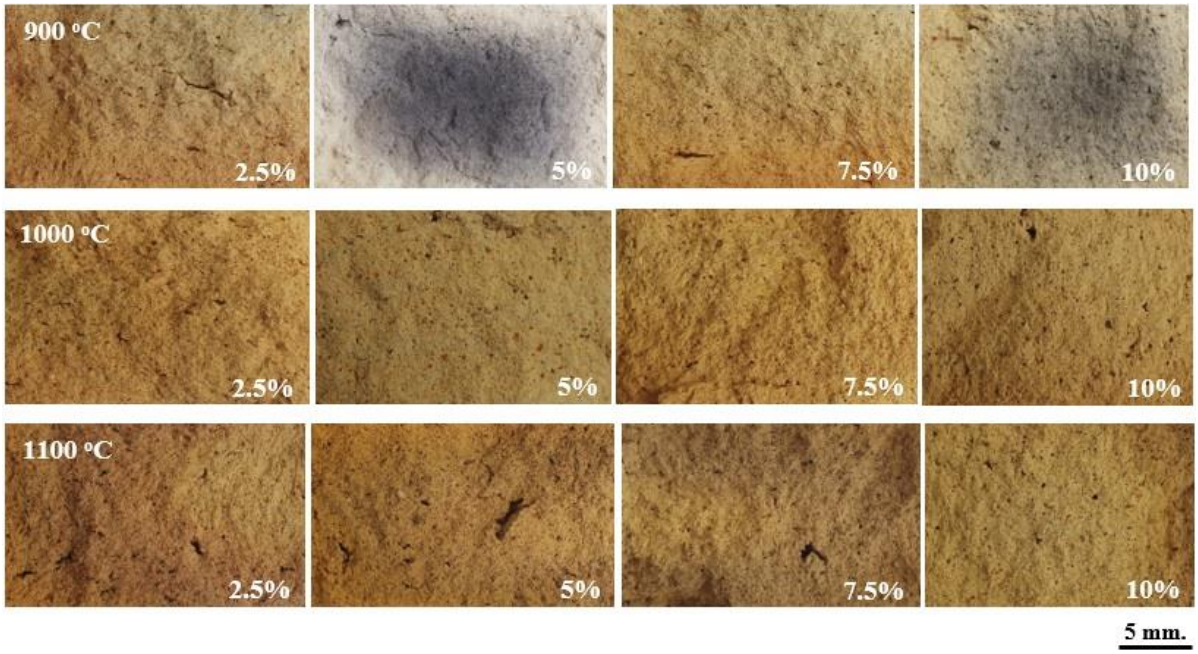
4.7.1 ความพรุนจริง (True porosity) เป็นอัตราส่วนระหว่างปริมาตรของช่องว่างทั้งหมด (ทั้งรูพรุนปิดและรูพรุนเปิด) ในวัตถุต่อปริมาตรทั้งหมดของวัตถุ

4.7.2 ความพรุนปรากฏ (Apparent porosity) เป็นอัตราส่วนระหว่างปริมาตรของน้ำหรือของเหลาที่วัตถุสามารถดูดซึมผ่านเข้าไปได้ต่อปริมาตรทั้งหมดของวัตถุ โดยทั่วไปเมื่อกล่าวถึงความพรุนจะหมายถึงความพรุนตัวปรากฏ

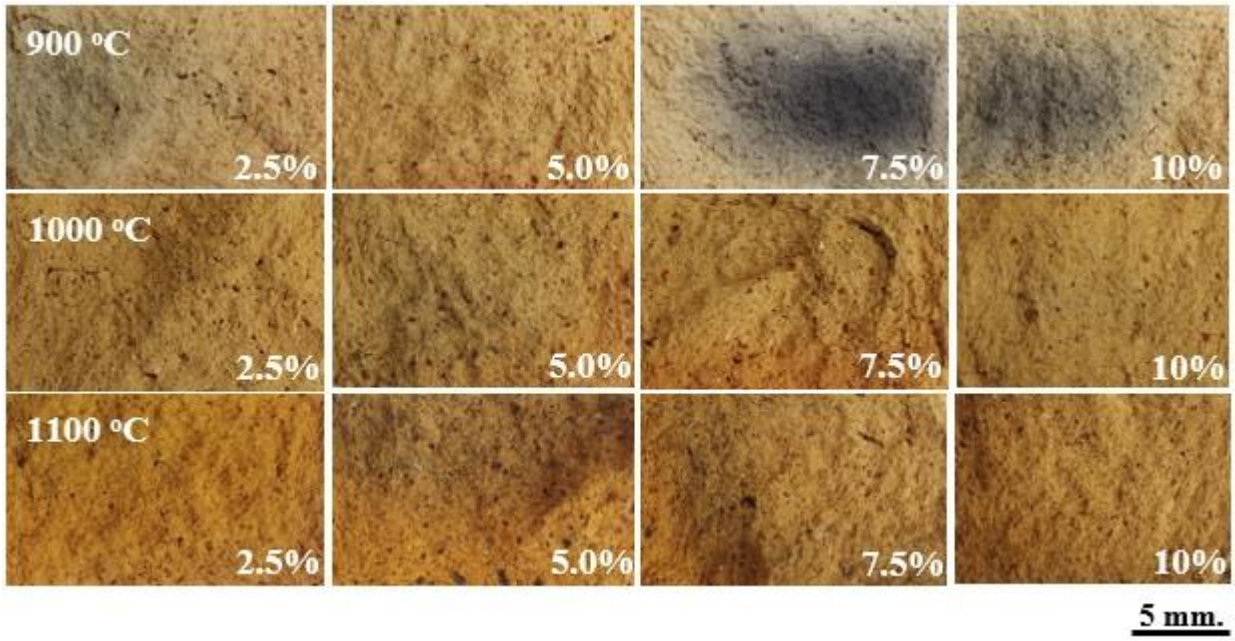
ผลจากเติมเศษวัสดุได้แก่ เถ้าชานอ้อย ขี้เลื่อย และแกลบข้าว เป็นส่วนผสมในการผลิตอิฐเพื่อศึกษาลักษณะของความพรุนตัวปรากฏ (Apparent porosity) แสดงตามภาพที่ 4.15-4.17



ภาพที่ 4.15 แสดงลักษณะพื้นผิวของอิฐหลังการเผาที่อุณหภูมิ 900-1100 องศาเซลเซียส ของการเติมปริมาณเถ้าชานอ้อยที่แตกต่างกัน



ภาพที่ 4.16 แสดงลักษณะพื้นผิวของอิฐหลังการเผาที่อุณหภูมิ 900-1100 องศาเซลเซียส ของการเติมปริมาณขี้เลื่อยที่แตกต่างกัน



ภาพที่ 4.17 แสดงลักษณะพื้นผิวของอิฐหลังการเผาที่อุณหภูมิ 900-1100 องศาเซลเซียส ของการเติมปริมาณแกลบข้าวที่แตกต่างกัน