การประยุกต์ใช้ตะกอนจากอุตสาหกรรมเหมืองแร่หินเพื่อการผลิตอิฐเผา

นายณัฐวุฒิ ธงชัย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2562
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

APPLICATION OF SEDIMENT FROM QUARRY INDUSTRY TO PRODUCE FIRED BRICKS

Mr. Nattawoot Thongchai

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Industrial Engineering
Department of Industrial Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2019
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประยุกต์ใช้ตะกอนจากอุตสาหกรรมเหมืองแร่หินเพื่อการผลิตอิฐเผา
โดย	นายณัฐวุฒิ ธงชัย
สาขาวิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.จิตรา รู้กิจการพานิช

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

-- คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

-- ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชาย พัวจินดาเนตร)

-- อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร.จิตรา รู้กิจการพานิช)

-- กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประมวล สุธีจารุวัฒน)

-- กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์สมชาย พวงเพิกศึก)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ณัฐวุฒิ ธงชัย : การประยุกต์ใช้ตะกอนจากอุตสาหกรรมเหมืองแร่หินเพื่อการผลิตอิฐเผา. (APPLICATION OF SEDIMENT FROM QUARRY INDUSTRY TO PRODUCE FIRED BRICKS) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.จิตรา รู้กิจการพานิช

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการวิเคราะห์หาสัดส่วนดินตะกอนจากอุตสาหกรรมเหมืองหินไปขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เป็นอิฐดินตะกอนโดยใช้ดินเหนียวเป็นส่วนผสม งานวิจัยเริ่มจาก 1) วิเคราะห์คุณสมบัติของตะกอนเพื่อหาองค์ประกอบของแร่ธาตุและสารประกอบที่พบในดินตะกอน 2) ทำการออกแบบการทดลองเพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์อิฐดินตะกอนจากเหมืองหิน โดยมีตัวแปรต้น ได้แก่ สัดส่วนผสมระหว่างตะกอนจากเหมืองและดินเหนียวตั้งแต่ร้อยละ 40 ถึง80 โดยน้ำหนัก และเผาที่อุณหภูมิ 900, 1000 และ1100 องศาเซลเซียส 3) ทำการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลและเชิงกายภาพของผลิตภัณฑ์แล้วสรุปผลงานวิจัย จากการศึกษาพบว่าที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส และสัดส่วนของดินตะกอนต่อดินเหนียวเป็น 60:40 ให้ความต้านแรงอัดสูงสุด เท่ากับ 43.67 เมกกะปาสคาล ซึ่งสูงกว่าอิฐมอญและอิฐดินเผา คิดเป็น 49.95 และ33.6 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ในขณะที่ค่าอัตราการดูดซึมน้ำของอิฐดินตะกอนจากเหมืองที่สัดส่วนดังกล่าวมีค่าเท่ากับ 11.53 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสูงกว่าอิฐมอญและอิฐดินเผาถึง 53.87 และ 67.63 เปอร์เซ็นต์ ส่วนค่าความหนาแน่นและค่าสูญเสียน้ำหนักของอิฐดินตะกอนจากเหมืองมีค่าเท่ากับ 1.37 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และ 17.37 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ นอกจากนี้ต้นทุนการผลิตของอิฐดินตะกอนจากเหมืองมีค่าต่ำกว่าอิฐดินเผา 24.76 เปอร์เซ็นต์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สาขาวิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ	ลายมือชื่อนิสิต	....
ปีการศึกษา	2562	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก	....

5970411021 : MAJOR INDUSTRIAL ENGINEERING
KEYWORD: quarrying process, residues, burned brick, industrial waste

Nattawoot Thongchai : APPLICATION OF SEDIMENT FROM QUARRY INDUSTRY TO PRODUCE FIRED BRICKS. Advisor: Assoc. Prof. Jittra Rukijkanpanich, D.Eng.

The objective of this research was to analyze for determining the proportions of residual from the quarry to produce sediment brick products by using clays. The methodology of this research was conducted with the following steps: 1) the analysis of residual properties for determining the composition of minerals and compounds found in residual, 2) the experimental design to develop clay brick product from the quarrying industry. The independent variables were the mixed proportion of sediment and clay under added sediment ratios from 40% to 80% by weight and burning temperature at 900, 1000 and 1100 °C, and 3) the test of mechanical and physical properties and conclusion. The results of this research showed that for heating at 1100 °C, 60% by weight of sediment mixed with 40% by weight of clay, maximum compressive strength of sediment brick was 43.67 MPa, which was higher than those of Mon brick and fired clay brick by 49.95% and 33.6%, respectively. With a same mixture ratio, water absorption of sediment brick was 11.53% , which was higher than those of Mon brick and fired clay brick by 53.87% and 67.63 %, respectively. The density and weight loss of sediment brick were 1.37 g/cm^3 and 17.37 % , respectively. In addition, the production cost of sediment brick from the quarry was lower than that of fried clay brick by 24.76 %.

Field of Study:	Industrial Engineering	Student's Signature ....
Academic Year:	2019	Advisor's Signature ....

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยการให้ความช่วยเหลือแนะนำของ รองศาสตราจารย์ ดร.จิตรา รู้กิจการพานิช ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำข้อคิดเห็นตรวจสอบ และแก้ไขร่างวิทยานิพนธ์มาโดยตลอด ผู้เขียนจึงขอกราบขอบพระคุณไว้ ณ โอกาสนี้

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชาย พัวจินดาเนตร ที่กรุณาให้เกียรติเป็นประธานโดยมี รองศาสตราจารย์ สมชาย พวงเพิกศึก และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประมวล สุธีจารุวัฒน เป็นกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้กรุณาตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้ถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ท้ายนี้ผู้เขียนขอน้อมรำลึกถึงอำนาจบารมีของคุณพระศรีรัตนตรัย และสิ่งศักดิ์สิทธิ์ทั้งหลายที่อยู่ในสากลโลก อันเป็นที่พึ่งให้ผู้เขียนมีสติปัญญาในการจัดทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ผู้เขียนขอให้เป็นกตเวทิตาแด่บิดา มารดา ครอบครัวของผู้เขียน ตลอดจนผู้เขียนหนังสือ และบทความต่าง ๆ ที่ให้ความรู้แก่ผู้เขียนจนสามารถให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี

ณัฐวุฒิ ธงชัย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ... ค

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ... ง

กิตติกรรมประกาศ ... จ

สารบัญ ... ฉ

สารบัญตาราง ... ซ

สารบัญรูป ... ฌ

บทที่ 1 บทนำ ... 1

1.1 ที่มาและความสำคัญ ... 1

1.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบและปริมาณที่อยู่ในตะกอน ... 7

1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย ... 10

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย ... 10

1.5 บทนิยามคำจำกัดความ ... 11

1.6 ขั้นตอนการดำเนินงาน ... 11

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ ... 15

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ... 16

2.1 การวิเคราะห์หน้าที่ ... 17

2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับอิฐมอญ ... 20

2.3 มาตรฐานของอิฐมอญ ... 25

2.4 คุณสมบัติของวัสดุ ... 25

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ... 29

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน ... 36

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.1 การออกแบบทดลอง 36
3.2 วิธีการทดลอง 38
3.3 การทดลอง 39
3.4 วิธีการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลและเชิงกายภาพ 42
3.5 ทำการประเมินคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ 44
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล 45
4.1 การวิเคราะห์หาขนาดของอนุภาคของสารตั้งต้นของตะกอนจากเหมืองและดินเหนียว 45
4.2 การวิเคราะห์หาองค์ประกอบของสารตั้งต้นของตะกอนในเหมืองหินและดินเหนียว 45
4.3 การวิเคราะห์หาปริมาณของสารตั้งต้นจากตะกอนในเหมืองหินและดินเหนียว 47
4.4 การวิเคราะห์หน้าที่ (Function) ของตะกอนเพื่อใช้เป็นองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ 47
4.5 การวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยการทดสอบคุณสมบัติเชิงกล 49
4.6 การเปรียบเทียบคุณสมบัติเชิงกลของอิฐชนิดต่าง ๆ 58
4.7 ผลการวิเคราะห์ปัจจัยที่เกี่ยวข้อง 60
4.8 การวิเคราะห์ทางวิศวกรรมคุณค่า 72
บทที่ 5 สรุปผลงานวิจัย 77
5.1 สรุปผลงานวิจัย 77
ภาคผนวก ก 82
ภาคผนวก ข 86
ภาคผนวก ค 90
ภาคผนวก ง 115
บรรณานุกรม 119
ประวัติผู้เขียน 122

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1.1 แผนและระยะเวลาในการดำเนินงานวิจัย 14
ตารางที่ 2.1 การแบ่งประเภทของอิฐมอญตามขนาดมาตรฐาน 25
ตารางที่ 2.2 มาตรฐานการแบ่งคุณสมบัติตามความต้านแรงอัดและร้อยละการดูดซึมน้ำ 25
ตารางที่ 3.1 การกำหนดปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการทดลอง 38
ตารางที่ 4.1 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันและเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ 46
ตารางที่ 4.2 หน้าที่ของสารที่เป็นองค์ประกอบชนิดต่าง ๆ 48
ตารางที่ 4.3 ผลของการทดสอบคุณสมบัติเชิงกล 49
ตารางที่ 4.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของผลการทดสอบค่าการดูดซึมน้ำ 61
ตารางที่ 4.5 ค่าสัมประสิทธิ์สมการถดถอยของค่าการดูดซึมน้ำ 63
ตารางที่ 4.6 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของผลการทดสอบค่าความหนาแน่น 64
ตารางที่ 4.7 ค่าสัมประสิทธิ์สมการถดถอยของค่าความหนาแน่น 66
ตารางที่ 4.8 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าการทดสอบความต้านแรงอัด 67
ตารางที่ 4.9 สัมประสิทธิ์ของสมการถดถอยค่าการทดสอบความต้านแรงอัด 69
ตารางที่ 4.10 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของผลการทดสอบค่าการสูญเสียน้ำหนัก 70
ตารางที่ 4.11 สัมประสิทธิ์ค่าการสูญเสียน้ำหนัก 72
ตารางที่ 4.12 แสดงข้อมูลที่ใช้ในขั้นตอนกระบวนการผลิตอิฐ 73
ตารางที่ 4.13 การวิเคราะห์ต้นทุนที่เกี่ยวข้องของผลิตอิฐดินเผาที่สัดส่วนการผสมต่าง ๆกัน 74

Chulalongkorn University

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 1.1 การลำเลียงหินจากเหมืองหินเพื่อเข้าสู่กระบวนการโม่หิน 1
รูปที่ 1.2 บ่อน้ำที่ผ่านการล้างหินแล้ว..... 2
รูปที่ 1.3 ลักษณะของดินตะกอนที่เกาะอยู่ที่หินก่อนเข้าสู่กระบวนการล้างหิน 2
รูปที่ 1.4 โครงสร้างของดินที่แทรกอยู่ในชั้นของหิน..... 3
รูปที่ 1.5 แผนที่ทางธรณีวิทยาจังหวัดชุมพร (กรมทรัพยากรธรณี, 2558)..... 4
รูปที่ 1.6 การตกตะกอนของผสมที่ประกอบด้วยดินตะกอน 5
รูปที่ 1.7 ดินตะกอนที่ออกจากเครื่องแยกเมื่อความชื้นบางส่วนหายไป 6
รูปที่ 1.8 ตะกอนที่ทำให้มีขนาดเล็กลงด้วยวิธีกายภาพ..... 6
รูปที่ 1.9 เครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟกซ์โตรมิเตอร์ (X-ray Diffractrometer)..... 7
รูปที่ 1.10 เครื่องวิเคราะห์ธาตุด้วยเอกเรย์ฟลูออเรสเซนต์ 8
รูปที่ 1.11 เครื่องหาขนาดของอนุภาค (Laser particle size distribution analyzer)..... 9
รูปที่ 2.1 การจัดเรียงอิฐที่จะเผาในระบบเปิดสู่บรรยากาศ 23
รูปที่ 2.2 การปนของเม็ดหินในอิฐกับการเผาอิฐโดยที่ความร้อนเข้าไปไม่ถึงข้างใน 24
รูปที่ 2.3 ข้อมูลราคาอิฐมอญ (ราคาบาท/ก้อน)..... 24
รูปที่ 2.4 กระบวนการเกิดการยึดติดกันของอนุภาค (J.W. Nowok, 1990) 29
รูปที่ 2.5 ผลการวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบที่อยู่ในเศษของหินแกรนิต (Chen et al., 2011)..... 31
รูปที่ 2.6 ผลการวิเคราะห์ค่าความยาวคลื่นด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนต์ 32
รูปที่ 2.7 องค์ประกอบตะกอนด้วยเครื่อง XRF (Martínez-Martínez et al., 2016)..... 33
รูปที่ 2.8 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบดินเหนียวและขี้เถ้าด้วยเครื่อง XRF (De Silva & Perera, 2018)..... 33
รูปที่ 2.9 ชนิดของการเปลี่ยนรูปร่างของข้าวชนิดต่างๆ (Sankar et al., 2016)..... 34

CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 3.1 การเสียรูปทรงของตะกอนที่ได้เผาที่ 1150 องศาเซลเซียส 36
รูปที่ 3.2 การเปลี่ยนขนาดของตะกอนจากเหมืองให้มีขนาดเล็กลง 38
รูปที่ 3.3 เปลี่ยนขนาดของดินเหนียวให้มีขนาดเล็กลง 39
รูปที่ 3.4 การเตรียมตะกอนจากเหมืองและดินเหนียวที่สัดส่วนการผสมต่างกัน 39
รูปที่ 3.5 การขึ้นรูปของดินตะกอนและดินเหนียวที่ผสมกันด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก ในขณะลงพิมพ์ 40
รูปที่ 3.6 ตะกอนจากเหมืองและดินเหนียวที่ผ่านการอัดการขึ้นรูป 40
รูปที่ 3.7 การวัดขนาดของอิฐที่ผ่านการขึ้นรูปก่อนทำการเผาที่อุณหภูมิสูง 41
รูปที่ 3.8 เตาเผาที่ใช้เอาอิฐดินเผาที่ 900 -1100 องศาเซลเซียส 41
รูปที่ 3.9 การวัดขนาดของอิฐที่ผ่านการขึ้นรูปหลังทำการเผาที่อุณหภูมิสูง 42
รูปที่ 4.1 ขนาดของอนุภาคของตะกอนดินจากเหมืองและดินเหนียวจากภาคกลาง 45
รูปที่ 4.2 กราฟการวิเคราะห์ที่ได้จากเครื่องเอ็กซ์เรย์-ดิฟแฟกซ์โตรมิเตอร์ 46
รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตะกอนกับอัตราการดูดซึมน้ำ 51
รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของตะกอนกับความหนาแน่น 53
รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตะกอนกับค่าความต้านแรงอัด 54
รูปที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตะกอนกับการสูญเสียน้ำหนัก 56
รูปที่ 4.7 ภาพที่เกิดจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด 57
รูปที่ 4.8 การเปรียบเทียบค่าความต้านแรงอัดระหว่างอิฐชนิดต่าง ๆ 59
รูปที่ 4.9 อัตราการดูดซึมน้ำระหว่างอิฐดินตะกอนจากเหมือง อิฐดินเผา และอิฐมอญ 60
รูปที่ 4.10 การกระจายของข้อมูลการทดลองการดูดซึมน้ำ 61
รูปที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของตะกอนกับอุณหภูมิการเผา 62
รูปที่ 4.12 กราฟแสดงการกระจายของข้อมูลการทดลองค่าความหนาแน่น 64
รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของตะกอนกับอุณหภูมิการเผา 65
รูปที่ 4.14 กราฟแสดงการกระจายของข้อมูลการทดลองค่าการทดสอบความต้านแรงอัด 67
รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของตะกอนกับอุณหภูมิการเผา 68

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูปที่ 4.16 กราฟการกระจายของข้อมูลการทดลองค่าการสูญเสียน้ำหนัก 70

รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของตะกอนกับอุณหภูมิการเผา.................. 71

รูปที่ 4.18 เปรียบเทียบค่าของความต้านแรงอัดต่อราคาบาท... 75

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

กระบวนการผลิตหินก่อสร้างของอุตสาหกรรมเหมืองแร่หินนั้น จะเริ่มจากการระเบิดหินที่เหมืองหิน แล้วลำเลียงหินจากเหมืองเข้าสู่กระบวนการโม่หินต่อไป ทั้งการระเบิดหินในเหมืองและกระบวนการโม่หินจะมีเศษดินปะปนอยู่ เศษดินเหล่านี้ถือว่าเป็นวัสดุไม่ใช้แล้วตามกฎหมายอุตสาหกรรม เศษดินเหล่านี้เมื่อมีปริมาณมากขึ้นอาจก่อให้เกิดการกีดขวางทางน้ำไหลได้ด้วย

เมื่อแร่หินลำเลียงหินจากเหมืองเข้าสู่กระบวนการโม่หินนั้น แร่หินที่มีขนาดใหญ่จะถูกทำให้มีขนาดเล็กลงด้วยเครื่องโม่หิน และมีการแยกขนาดของหินโดยใช้ตะแกรงแยก เมื่อหินถูกย่อยให้มีขนาดเล็กลงจะมีผลิตภัณฑ์หินขนาดต่าง ๆ เรียกว่า หินเบอร์ ซึ่งมีขนาดตามที่ลูกค้าต้องการนำไปใช้ รวมทั้งมีหินคลุกซึ่งจะยังคงมีเศษดินปะปนอยู่กับหิน แต่ถ้ามีดินปะปนอยู่มากเป็นสิ่งที่ลูกค้าไม่ต้องการ และถือว่าเป็นวัสดุไม่ใช้แล้ว ไม่สามารถใช้ประโยชน์ในการก่อสร้าง จึงจำเป็นต้องมีกระบวนการแยกดินออกซึ่งเรียกว่า การล้างหิน เพื่อเอาดินออกจากหิน ดินที่แยกออกมาด้วยกระบวนการล้างหินนั้นมีลักษณะเป็นตะกอนเนื้อละเอียด สีน้ำตาล เมื่อดินตะกอนแห้งจะมีลักษณะเป็นผงขนาดเล็ก สีน้ำตาล และจับตัวเป็นก้อน ดินตะกอนเหล่านี้ถือได้ว่าอาจมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยดินตะกอนเหล่านี้จะถูกพัดพาไปตามกระแสน้ำส่งผลให้บริเวณปากแม่น้ำเกิดการตื้นเขิน ก่อให้เกิดการระบายน้ำไม่เป็นไปตามธรรมชาติซึ่งทำให้เป็นสาเหตุของอุทกภัยได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 1.1 การลำเลียงหินจากเหมืองหินเพื่อเข้าสู่กระบวนการโม่หิน

ในการแยกดินตะกอนที่ปะปนมากับแร่หินเพื่อเข้าสู่โรงโม่นั้น ทางโรงงานได้มีกระบวนการล้างหินโดยเริ่มจากการลำเลียงหินที่ไม่เป็นไปตามข้อกำหนด (Non-specification) คือหินที่มีดินตะกอนเปียกติดอยู่กับหินไปผ่านสายพาน (Conveyor) เข้าสู่เครื่องล้างหิน หินที่ถูกล้างแล้วจะถูกนำไปขายได้ ส่วนน้ำที่ล้างแล้วก็จะถูกนำไปบำบัดต่อไป วิธีการบำบัดขั้นต้นคือการแยกดินตะกอนออกมา

ดินตะกอนที่ได้จากการล้างหินจะมีลักษณะเป็นตะกอนเนื้อละเอียด ขนาดเล็กสีน้ำตาลแดง เมื่อมีความชื้นจะสามารถจับตัวเป็นก้อนและเมือแห้งจะมีลักษณะเป็นก้อนแข็ง สามารถนำไปบดให้มีขนาดเล็กลงได้ซึ่งจะได้ผงตะกอนที่มีขนาดเล็กละเอียด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 1.2 บ่อน้ำที่ผ่านการล้างหินแล้ว

รูปที่ 1.3 ลักษณะของดินตะกอนที่เกาะอยู่ที่หินก่อนเข้าสู่กระบวนการล้างหิน

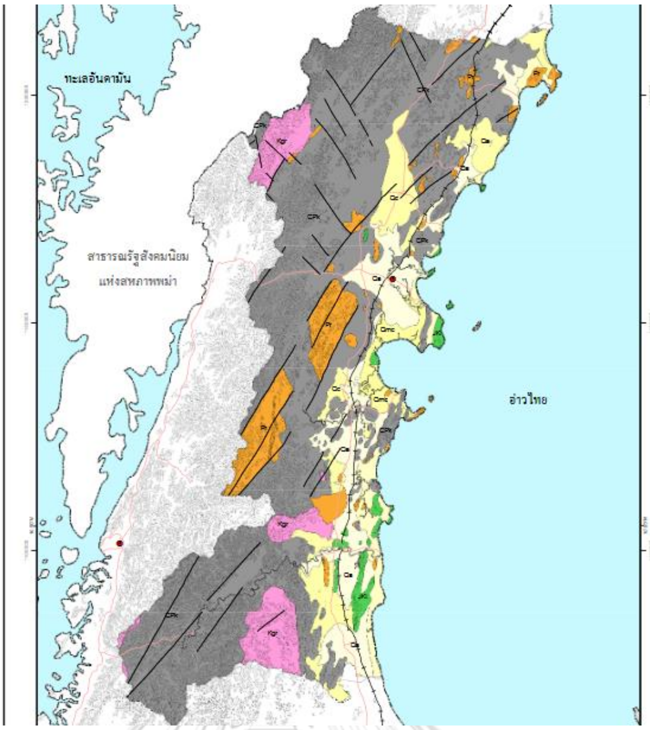
จากกระบวนการล้างดินตะกอนที่ติดมาจากหิน พบว่าปริมาณดินตะกอนที่เปียกจะเกาะอยู่กับหิน โดยจะแทรกอยู่ในระหว่างชั้นหินที่ความลึกต่างกันดังในรูปที่ 1.3 ซึ่งในชั้นหินแต่ละ

ช่วงความสูงต่างจะมีดินที่แทรกอยู่ไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับภูมิศาสตร์ของโครงสร้างของชั้นดินดังรูปที่ 1.4 และรูปที่ 1.5 ซึ่งในตำแหน่งของบริเวณที่ทำเหมืองหินนั้นอยู่ในโซนที่เป็นภูเขาทางภาคใต้ของประเทศไทย โดยโครงสร้างของภูเขาในภาคใต้นั้นมีลักษณะเป็นภูเขาหินปูนและมีดินแทรกตามอยู่ของชั้นหิน โดยดินที่แทรกอยู่นั้นเป็นดินที่มีลักษณะเป็นของแข็ง เนื้อละเอียด

รูปที่ 1.4 โครงสร้างของดินที่แทรกอยู่ในชั้นของหิน

เมื่อดินตะกอนได้รับความชื้นหรือได้รับปริมาณน้ำที่มากพอจะทำให้ดินเหล่านี้มีลักษณะเหนียวเมื่อไปเกาะอยู่ที่หินส่งผลให้เกิดการติดกันระหว่างหินกับตะกอน ซึ่งเมื่อหินเหล่านี้ไปผ่านกระบวนการแปรรูปลดขนาดทำให้หินมีเศษของดินติดไป ส่งผลทำให้ต้องไปสู่กระบวนการล้างหิน ซึ่งเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับหินมีราคาที่สูงขึ้น ซึ่งการนำหินไปใช้ประโยชน์จำเป็นต้องเป็นหินที่ผ่านการล้างหรือหินที่มีปริมาณดินติดอยู่น้อย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 1.5 แผนที่ทางธรณีวิทยาจังหวัดชุมพร (กรมทรัพยากรธรณี, 2558)

จากที่ตั้งของโรงงานเหมืองหินที่อยู่ในจังหวัดชุมพรตั้งอยู่บริเวณที่ประกอบไปด้วยโครงสร้างทางธรณีวิทยาที่ประกอบด้วยหินกรวด ทรายแป้ง และดินเหนียว โดยตะกอนเหล่านี้มีขนาดที่เล็กลักษณะ เป็นตะกอนค่อนข้างละเอียด มีอนุภาคขนาดเล็ก ด้วยคุณสมบัติของขนาดที่เล็กและมีแร่ธาตุพวกสารประกอบคาร์บอเนตจะทำให้ดินตะกอนพวกนี้มีการจับตัวเป็นก้อนดินได้ ซึ่งเมื่อไปดูบริเวณของตำแหน่งที่ตั้งก็พบว่ามีปริมาณของการสะสมตะกอนในชั้นหินซึ่งก็สอดคล้องกับรูปที่ 1.5

ในกระบวนการทำเหมืองหินที่เข้าไปสู่กระบวนการโม่งหินแต่ละวันจะมีกำลังการผลิตของโรงโม่หินอยู่ที่ 1,500 ลูกบาศก์เมตร ซึ่งเมื่อผ่านการโม่หินแล้วจะเหลือหินที่สามารถนำไปขายอยู่ 1,200 ลูกบาศก์เมตร ส่วนที่เหลือ 300 ลูกบาศก์เมตร จะเป็นดินปนทรายและปนเศษหินออกมา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 1.6 การตกตะกอนของผสมที่ประกอบด้วยดินตะกอน

ในส่วนของการล้างหิน หินที่ผ่านการแปรรูปลดขนาดลงจะถูกลำเลียงผ่านสายพานมายังเครื่องล้างหิน โดยเครื่องล้างหินมีลักษณะเป็นทรงกระบอกแนวนอน มีการป้อนเข้าของหิน ซึ่งหินที่ป้อนเข้าไปจะมีการปนเปื้อนของดินอยู่ด้วย และการป้อนเข้าของสายน้ำเพื่อไปทำความสะอาดหิน ซึ่งหินก็จะเคลื่อนที่เข้าและออกตามทรงแนวนอนของรูปทรงกระบอก ซึ่งหินที่ออกมานั้นจะมีทางออกเพียงทางเดียว แต่ในส่วนของสายน้ำที่ออกจากเครื่องล้างหินนั้นจะถูกส่งออกมาทางเดียวเหมือนกัน แล้วไหลไปรวมที่ตำแหน่งในบ่อเดียวกัน โดยน้ำออกมานั้นจะมีดินตะกอนปนอยู่ในน้ำดังรูปที่ 1.6 ซึ่งตะกอนที่อยู่ในน้ำนั้นมีลักษณะเป็นตะกอนละเอียดสีน้ำตาล สามารถถูกพัดพาเคลื่อนที่ไปในน้ำได้อย่างอิสระ เมื่อตะกอนเหล่านี้ไม่มีการรบกวนหรือไม่ได้รับแรงพัดพาจากน้ำก็จะเกิดการตกตะกอนเป็นชั้น หรือจับตัวเป็นชั้นของตะกอน ซึ่งจากโครงสร้างภูเขาหินปูนนั้นมีปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตอยู่ในธรรมชาติ แคลเซียมคาร์บอเนตมีคุณสมบัติตามธรรมชาติคือเป็นสารที่ทำให้เกิดการจับตัวรวมกลุ่มของอนุภาคขนาดเล็กอยู่แล้ว ซึ่งสอดคล้องกับการสังเกต พบว่าเมื่อนำน้ำที่ได้จากการล้างหินมาตั้งไว้ 5-10 นาที จะพบว่ามีการตกตะกอนที่ค่อนข้างเร็ว ในส่วนนี้จะเป็นข้อได้เปรียบตรงที่น้ำที่มีชั้นตะกอนอยู่ด้านล่างสะสมกันอยู่ เมื่อติดตั้งเครื่องดูดตะกอน จะทำให้การทำงานง่ายขึ้น โดยตะกอนที่ถูกดูดไปจะผ่านกระบวนการแยกหินขนาดเล็กที่ปนเปื้อนมา โดยตะกอนที่ถูกแยกออกจากเครื่องแยกตะกอนจะมีลักษณะเป็นของแข็งขนาดเล็ก มีสีน้ำตาล โดยมีการจับตัวเป็นก้อนดังรูปที่ 1.7 เพราะว่าในระหว่างการแยกดินตะกอนออกจากน้ำนั้น เครื่องที่ทำการแยกดินตะกอนจะใช้การรีดดินตะกอนออกจากน้ำ ซึ่งจะทำให้ดินที่ถูกแยกออกมาจากน้ำนั้นมีลักษณะเป็นก้อนออกมา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ในกระบวนการล้างหิน เครื่องล้างหินมีอัตราการทำงานอยู่ที่ 200 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ซึ่งหินที่เข้าเครื่องล้างหินและดินที่ออกมาจะอยู่ที่ 20% ดังนั้นในการทำเหมืองหินในหนึ่งเดือนมีหินเข้าสู่เหมืองที่ 35,000 ลูกบาศก์เมตร จะมีดินหรือตะกอนออกจากเครื่องล้างหิน 7,000 ลูกบาศก์เมตร ซึ่ง

ดินตะกอนที่ออกมาจะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมรอบข้าง เนื่องจากดินตะกอนนี้มีลักษณะที่ไม่เหมือนกับดินทั่วไป

รูปที่ 1.7 ดินตะกอนที่ออกจากเครื่องแยกเมื่อความชื้นบางส่วนหายไป

เมื่อตะกอนที่ถูกแยกออกจากเครื่องแยกดินจะถูกกองไว้ ซึ่งในสภาวะที่มีความร้อน จะทำให้เกิดการแห้งหรือการระเหยน้ำออกไปจะทำให้สีของดินมีขนาดจางลง และเมื่อไปสัมผัสจะพบว่าตะกอนมีลักษณะที่เป็นของแข็งจับตัวเป็นก้อน ซึ่งในตรงนี้สันนิษฐานได้ว่าตะกอนนี้มีลักษณะเป็นของแข็งที่มีความแข็งระดับหนึ่งโดยที่ยังไม่ผ่านกระบวนการแปรรูปใดก็ตาม ซึ่งทำให้เกิดแนวคิดที่ว่าเมื่อดินตะกอนที่มีความเปียกอยู่ สามารถนำไปปรับขนาดหรือขึ้นรูปร่างของดินได้ และเมื่อความชื้นที่สะสมอยู่ในตะกอนถูกทำให้ลดลงก็จะทำให้ดินมีความแข็งแรงขึ้น ดังนั้นเมื่อนำตะกอนที่ไปทำการลดขนาดให้เล็กลงด้วยวิธีทางกายภาพดังรูปที่ 1.8 จะสามารถนำไปใช้งานในการขึ้นรูปเป็นรูปอื่น หรือนำไปเป็นส่วนผสมหรือส่วนประกอบอื่นได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูปที่ 1.8 ตะกอนที่ทำให้มีขนาดเล็กลงด้วยวิธีกายภาพ

1.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบและปริมาณที่อยู่ในตะกอน

ตะกอนที่ได้จากอุตสาหกรรมเหมืองหินนั้นมีแร่ธาตุที่หลากหลายจึงต้องทำการการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสารประกอบและแร่ต่าง ๆ ด้วยเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟกซ์โตรมิเตอร์ (X-ray Diffractrometer) โดยใช้หลักการยิงรังสีเอกซ์ที่ทราบความยาวคลื่นองศาในการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ไปกระทบชิ้นงานทำให้เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีที่มุมต่างกันโดยมีหัววัดเป็นตัวรับข้อมูล ซึ่งองศาในการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของสารที่อยู่ในดินตะกอน ทำให้เราสามารถรับรู้หรือทราบถึงองค์ประกอบในดินตะกอนได้ ส่วนผลการวิเคราะห์เป็นการหาชนิดของธาตุที่อยู่ในตะกอน โดยใช้หลักการรังสีเอกซ์ที่มีพลังงานสูงไปกระทบชิ้นงานทำให้ชิ้นงานเกิดการปล่อยโฟตอนออกมา โฟตอนที่ถูกปล่อยออกมาจากธาตุต่างชนิดในชิ้นงานจะมีความยาวคลื่นที่แตกต่างกันของแต่ละธาตุ ทำให้ทราบชนิดของธาตุที่อยู่ในตะกอน การวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟกซ์โตรมิเตอร์จะใช้รุ่น D8-Discover แสดงในรูปที่ 1.9

รูปที่ 1.9 เครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟกซ์โตรมิเตอร์ (X-ray Diffractrometer)

นอกจากนี้ยังมีการวิเคราะห์ด้วยเอกซ์เรย์ แบบเทคนิคการเรืองรังสี (X-Ray Fluorescence Spectrometer ,WDXRF) เพื่อหาปริมาณของององค์ประกอบของสารเคมีที่อยู่ในดินตะกอนเพื่อให้ทราบสัดส่วนของสารประกอบ ซึ่งการวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณของธาตุในสารตัวอย่างจะใช้การวัดอัตราการเรืองรังสีเอกซ์ที่เป็นลักษณะเฉพาะของธาตุ ซึ่งปล่อยออกมาจากอะตอมที่สภาวะถูก

กระตุ้น ลักษณะการทำงานเป็นแบบ Sequential Type Spectrometry โดยใช้ผลึก (Analyzer Crystal) กระจายความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ ในการทดลองนี้ใช้เครื่องรุ่น S8 Tiger

รูปที่ 1.10 เครื่องวิเคราะห์ธาตุด้วยเอกเรย์ฟลูออเรสเซนต์

การวิเคราะห์หาขนาดของอนุภาคของสารตั้งต้น เพื่อวัดขนาดและการกระจายตัวของตัวอย่างที่มีลักษณะเป็นผง ด้วยเครื่อง Laser particle size distribution analyzer รุ่น MALVERN, Mastersizer 3000 เพื่อให้ทราบขนาดของอนุภาคของดินตะกอนและถึงขนาดที่ต่างกัน โดยใช้หลักการ Laser diffraction ด้วยการกระจายตัวอย่างในสารตัวกลางที่ไม่ทำละลายตัวอย่าง (dispersant) สามารถเลือกตัวกลางเป็นของเหลว (วัดแบบเปียก) หรือ ตัวกลางเป็นอากาศ (วัดแบบแห้ง) วัดขนาดของอนุภาคในช่วงระหว่าง 0.01–3,500 ไมโครเมตร สำหรับตัวอย่างที่เป็นสารแขวนลอยในน้ำ หรือตัวกลางที่เป็นแอลกอฮอล์สามารถวัดขนาดและถ่ายภาพการกระจายของอนุภาคได้ในช่วง 0.5-1,000 ไมโครเมตร ปริมาณของตัวอย่างสำหรับวัดแบบเปียก ถ้าตัวอย่างเป็นผงแห้งน้ำหนักไม่น้อยกว่า 1 กรัม ตัวอย่างของเหลวไม่น้อยกว่า 600 มิลลิลิตร และต้องสามารถมองเห็นว่ามีอนุภาคอยู่ เช่น ขุ่น หรือ มีตะกอน ปริมาณของตัวอย่างสำหรับวัดแบบแห้ง ต้องเป็นผงแห้ง น้ำหนักไม่น้อยกว่า 20 กรัม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ขนาดของอนุภาคดินตะกอนที่ได้จากเหมืองและดินเหนียวมีขนาดที่ใกล้เคียงกัน และปริมาณของขนาดไม่ต่างกันมาก ทำให้มีแนวโน้มที่จะสามารถนำมาผสมเป็นเนื้อเดียวกันได้ และไม่แบ่งชั้นของวัตถุดิบ

รูปที่ 1.11 เครื่องหาขนาดของอนุภาค (Laser particle size distribution analyzer)

จากที่กล่าวมาข้างต้น จะพบว่ามีความเป็นไปได้ที่จะนำตะกอนซึ่งเป็นวัสดุไม่ใช้แล้วที่เกิดจากอุตสาหกรรมเหมืองแร่หิน ไปวิเคราะห์ด้วยวิธีการทางวิทยาศาสตร์แล้วนำไปผลิตเป็นอิฐดินเผาให้เกิดประโยชน์ต่อไป ซึ่งต้องทำการศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องที่ทำให้อิฐเผามีคุณสมบัติเชิงกลเป็นไปตามมาตรฐานของผลิตภัณฑ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อหาสัดส่วนของดินตะกอนที่ได้จากการกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมเหมืองหินต่อดินเหนียวสำหรับการผลิตเป็นอิฐดินตะกอนภายใต้อุณหภูมิการใช้ความร้อนที่สูงสุดที่ยังคงรักษาสภาพการคงรูปทรงได้

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

1.4.1 ด้านการรวบรวมข้อมูลและการวิเคราะห์

1. ทำาการศึกษาองค์ประกอบของดินตะกอนที่ได้จากอุตสาหกรรมเหมืองหินในจังหวัดชุมพร

2. ทำาการศึกษาองค์ประกอบดินเหนียวที่ได้จากจังหวัดพระนครศรีอยุธยาที่นำไปใช้การผสมกับดินตะกอน

1.4.2 ด้านการทดลอง

1.ทำการศึกษาสัดส่วนของการผสมดินตะกอนต่อดินเหนียวที่ร้อยละ 40% - 80% เท่านั้น

2.ทำการศึกษาการเพิ่มขึ้นของดินตะกอน ต่อดินเหนียวที่เพิ่มขึ้นทีละ 10% เท่านั้น

3.การขึ้นรูปด้วยค่าแรงกดของการขึ้นรูปของผสมที่ 1×10^{6} นิวตัน

4.ขนาดของอิฐที่ใช้การขึ้นรูปกำหนดไว้เป็นค่ากว้างxยาวxสูงเท่ากับ 50x50x25 มิลลิเมตร

5.กำหนดช่วงการเผาที่อุณหภูมิ 900, 1000 และ 1000 °C โดยเพิ่มอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ 5 °C ต่อนาที อุณหภูมิของระยะการเผาที่ 2 ชั่วโมง

6. ทำการทดสอบคุณสมบัติเชิงกล ประกอบด้วย ความหนาแน่น (Density) อัตราการดูดซึมน้ำ (Water Absorption) ความต้านแรงอัด (Compressive Strength) การสูญเสียน้ำหนัก (Weight Loss) และการส่องโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

1.4.3 ด้านการวิเคราะห์ผล

1. ทำการวิเคราะห์ปัจจัยที่เกี่ยวข้องด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป minitab18 ในการวิเคราะห์กำหนดค่าระดับนัยสำคัญที่ α=0.05

2. การเปรียบเทียบราคาด้านสาธารณูปโภค การขนส่ง ค่าแรงงาน อิงในปี พ.ศ. 2560 เท่านั้น

1.5 บทนิยามคำจำกัดความ

อิฐดินเผา คือ อิฐที่มีส่วนประกอบของดินเหนียวจากจังหวัดพระนครศรีอยุธยาเพียงอย่างเดียว ขึ้นรูปด้วยเครื่องกดไฮดรอลิก (Hydraulic press) และเผาด้วยเตาเผาอุณหภูมิสูงที่อุณหภูมิ 900 - 1100 องศาเซลเซียส

อิฐดินตะกอนจากเหมืองหิน คือ อิฐที่มีส่วนผสมของดินตะกอนที่ได้จากเหมืองหินจากจังหวัดชุมพรและดินเหนียวจากจังหวัดพระนครศรีอยุธยา ซึ่งสัดส่วนการผสมตะกอนจากเหมืองอยู่ที่ 40-80 เปอร์เซ็นต์ ขึ้นรูปด้วยเครื่องกดไฮดรอลิก (Hydraulic press) และเผาด้วยเตาเผาอุณหภูมิสูงที่อุณหภูมิ 900 - 1100 องศาเซลเซียส

อิฐมอญ คือ อิฐที่มีส่วนประกอบของดินเหนียวจากจังหวัดพระนครศรีอยุธยา แกลบ และเถ้าลอย ขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ และเผาด้วยระบบเปิด

1.6 ขั้นตอนการดำเนินงาน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

แบ่งออกเป็นช่วง 3 ช่วง ดังนี้

ระยะที่1 เป็นระยะรวบรวมข้อมูลและศึกษาองค์ประกอบของสารตั้งต้น

1.) รวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับผลิตภัณฑ์ที่ทำจากตะกอนและศึกษาวิเคราะห์คุณสมบัติของตะกอนเพื่อหาองค์ประกอบของแร่ธาตุและสารประกอบที่พบในตะกอนด้วยการวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray Diffractrometer) และเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนต์ (X-ray Fluorescence Spectroscopy)

2.) ทำการวิเคราะห์หน้าที่ (Function) ของตะกอนเพื่อใช้เป็นองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์

ระยะที่2 ออกแบบการทดลองและทดลองหาปัจจัยที่เกี่ยวข้อง

1.) ทำการทดลองนำร่องเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ทางคุณสมบัติเชิงกล โดยนำตะกอนที่ได้ไปทำการอัดขึ้นรูปแล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิสูงสุดเพื่อดูความคงรูปของตะกอน

2.) ทำการเปรียบเทียบข้อมูลพื้นฐานและคัดเลือกผลิตภัณฑ์ที่จะออกแบบ โดยใช้คุณสมบัติเชิงกลเป็นสิ่งคัดเลือก (พบว่าอิฐเผาเหมาะสมที่จะนำไปทำการออกแบบเป็นผลิตภัณฑ์ต้นแบบ)

3.) ทำการสร้างสรรค์ผลิตภัณฑ์ด้วยกำหนดปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติเชิงกล ซึ่งอ้างอิงจากองค์ประกอบและคุณสมบัติของสารประกอบที่ได้จากงานวิจัยในข้างต้น

ตัวแปรต้น ประกอบด้วย ปริมาณตะกอนจากเหมืองหิน และ อุณหภูมิในการให้ความร้อน

1. การผสมของตะกอนจากเหมืองหินที่ร้อยละ 40-80 โดยน้ำหนัก

2. อุณหภูมิที่เผา 900, 1000, 1100 องศาเซลเซียส

ตัวแปรควบคุม

1. แรงที่อัดในการขึ้นรูปอิฐ 1×10^6 นิวตัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

2. ขนาดของแม่พิมพ์ที่ใช้ 50 x 50 x 25 มิลลิเมตร

ตัวแปรตาม ทดสอบคุณสมบัติ ดังนี้

1. ความหนาแน่น (Density)

2. อัตราการดูดซึมน้ำ (Water Absorption)

3. ความต้านแรงอัด (Compressive Strength)

4. การสูญเสียน้ำหนัก (Weight Loss)

5. โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Scanning Electron Microscopy (SEM)

4.) ทำการออกแบบการทดลองเพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์อิฐดินตะกอนจากเหมืองหิน

ระยะที่3 ทำการวิเคราะห์ปัจจัยที่ได้จากการทดลองและผลของปัจจัยที่เกี่ยวข้อง

1.) ทำการประเมินคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ด้วยการทดสอบคุณสมบัติเชิงกล

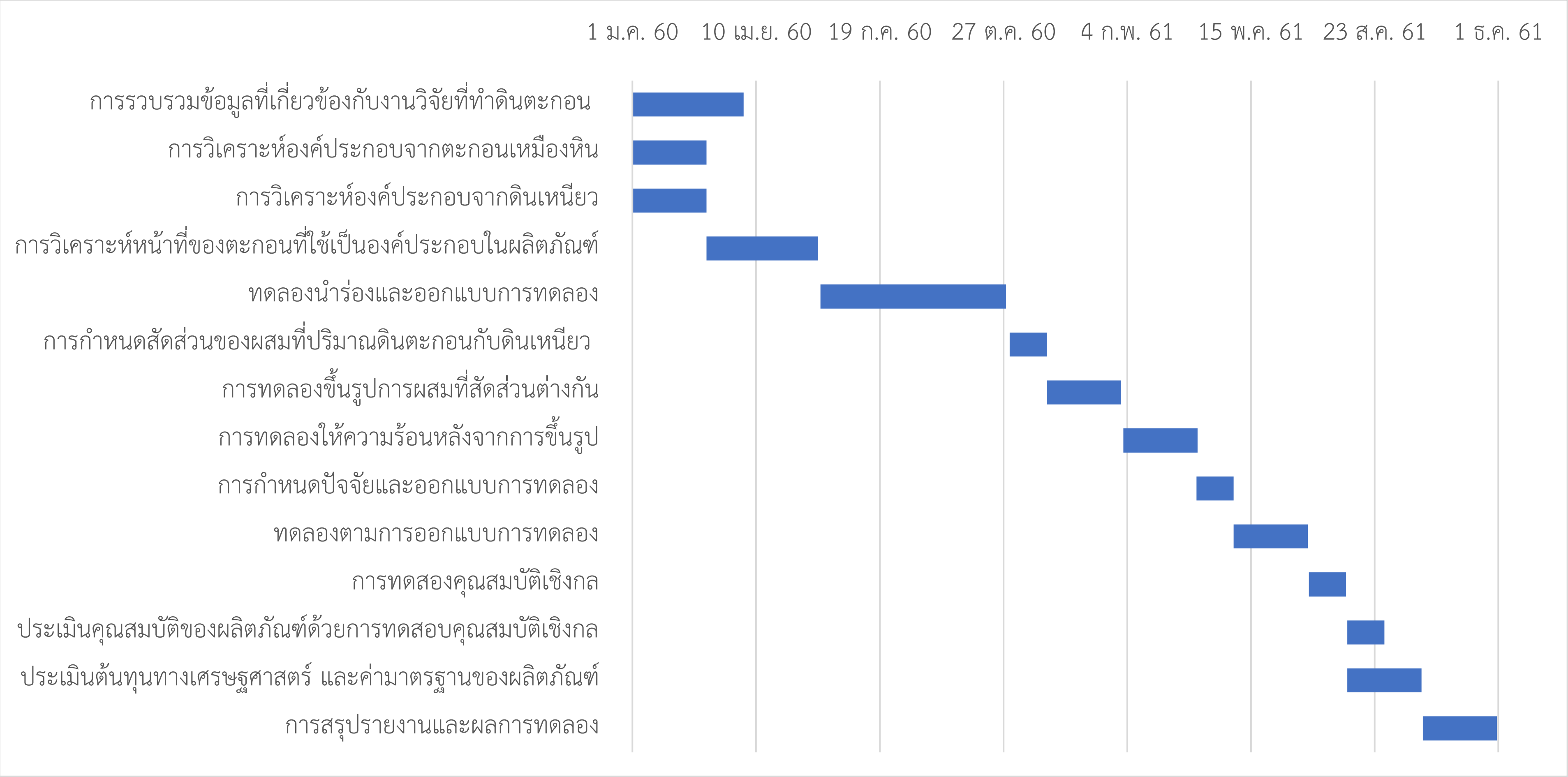
1. ความหนาแน่น
2. อัตราการดูดซึมน้ำ
3. ความต้านแรงอัด
4. การสูญเสียน้ำหนัก
5. โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

2.) เปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานของผลิตภัณฑ์และทำการประเมินต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์

3.) ทำการวิเคราะห์และสรุปผลการทดลองและจัดทำรายงาน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 1.1 แผนและระยะเวลาในการดำเนินงานวิจัย



1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.) ได้ทราบองค์ประกอบที่อยู่ในดินตะกอนและดินเหนียวและสารประกอบของแต่ละชนิดมีผลต่อคุณสมบัติเชิงกล

2.) ได้ทราบแนวทางการใช้เครื่องมือการวิเคราะห์ทางเทคนิคที่วิเคราะห์หาองค์ประกอบ

3.) ทราบปัจจัยที่เกี่ยวข้องของการทำอิฐ

4.) ทราบถึงขั้นตอนการทำอิฐ และการทดสอบคุณสมบัติเชิงกล

5.) ได้สัดส่วนของดินตะกอนต่อดินเหนียวที่จะไปทำอิฐได้

6.) เพื่อสร้างต้นแบบการนำตะกอนซึ่งเป็นวัสดุที่ไม่ใช้แล้วในอุตสาหกรรมเหมืองเหมืองหินไปเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีคุณค่า

7.) ส่งเสริมให้เป็นอุตสาหกรรมเหมืองหินสีเขียว ลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม เช่น การทำให้แม่น้ำลำคลองเกิดการตื้นเขิน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การออกแบบผลิตภัณฑ์ (Product Design) เป็นกระบวนการวางแผนหรือสร้างผลิตภัณฑ์ขึ้นมาโดยให้มีคุณสมบัติสอดคล้องตามความต้องการของการใช้งาน ความต้องการของตลาด ภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด และอาศัยหลักความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับพื้นฐานของการออกแบบผลิตภัณฑ์เพื่อให้ตอบสนองของการใช้งาน การออกแบบผลิตภัณฑ์มีปัจจัยที่เกี่ยวข้อง 4 ประการคือ

1. การออกแบบที่สัมพันธ์กับคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตขึ้นด้วยกรรมวิธีทางด้านอุตสาหกรรมภายใต้สิ่งแวดล้อมที่เกี่ยวกับอุตสาหกรรม จะมีการวิเคราะห์ข้อมูลที่เกี่ยวกับหน้าที่ใช้สอยของผลิตภัณฑ์ โดยผลิตภัณฑ์จะมีหน้าที่ที่แตกต่างกันออกไปตามลักษณะการใช้งานและคุณภาพของการใช้งาน ซึ่งคุณภาพที่นำมาพิจารณาการออกแบบจะมองในถึงการคุ้มค่าของการใช้งานและคุณสมบัติที่เป็นจุดเด่นของผลิตภัณฑ์

2. การออกแบบที่สัมพันธ์กับวัสดุและกระบวนการผลิต วัสดุแต่ละชนิดมีคุณสมบัติหรือจุดเด่นที่แตกต่างกันออกไป เช่น ความใส ผิวมันวาว ทนความร้อน เป็นต้น คุณสมบัติของวัสดุที่นำมาสร้างผลิตภัณฑ์ล้วนมีความเหมาะสมที่ต่างกันออกไป ดังนั้นเพื่อเหมาะสมกับหน้าที่ใช้สอยของผลิตภัณฑ์จำเป็นต้องพิจารณาวัสดุที่นำมาผลิตรวมและกระบวนการที่ผลิต เพื่อความสะดวกรวดเร็วในการผลิตรวมไปถึงการตอบสนองความในการดูแลรักษา และยิ่งไปกว่านั้นการเลือกใช้วัสดุที่หมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ได้ (Recycle) ก็เป็นสิ่งที่นักอกแบบต้องตระหนักถึงในการออกแบบร่วมด้วย

3. การออกแบบที่สัมพันธ์กับความต้องการของผู้บริโภค เป็นสิ่งสำคัญที่มีผลต่อประสบการณ์การใช้งานของผู้บริโภค (User Experience) โดยผู้บริโภคนั้นจะพิจารณาความต้องการผลิตภัณฑ์ที่ตอบสนองต่อการแก้ปัญหาที่มีอยู่ หรือช่วยเสริมสร้างการใช้งานให้มีความหลากหลาย โดยผลิตภัณฑ์จะเป็นที่ต้องการของผู้บริโภคต้องแสดงให้เห็นในด้านความคุ้มค่าการใช้งาน (Functional Value) และคุ้มค่ากับเงิน (Financial Value)

4. การออกแบบที่มีคุณค่าทางความสวยงาม เป็นการออกแบบผลิตภัณฑ์ให้มีรูปทรง ขนาด สีสันสวยงาม น่าใช้ตรงตามกลุ่มเป้าหมายของใช้ ซึ่งการเพิ่มมูลค่าผลิตภัณฑ์ที่ได้รับความนิยมและได้ผลดีเพราะสิ่งแรกที่ผู้บริโภคเห็นคือรูปร่างภายนอก ถ้ารูปร่างภายนอกให้มีความน่าดึงดูดให้ใช้งานก็จะเป็นสิ่งที่เพิ่มความสนใจ ดังนั้นความสวยงาม รูปร่างและสี จึงเป็นความพึงพอใจแรกที่คนเราสัมผัสได้ก่อน

เทคนิควิศวกรรมคุณค่า (Value Engineering) เป็นวิธีการหรือกระบวนการที่ใช้ในการเพิ่มคุณค่าด้วยการเพิ่มหน้าที่การทำงาน หรือเพิ่มคุณสมบัติ ลักษณะให้กับผลิตภัณฑ์หรือเป็นการลดต้นทุนที่เกินความจำเป็นของกระบวนการผลิต โดยการเพิ่มคุณค่านั่นมีด้วยกันหลายวิธี การเพิ่มคุณค่านั้น สามารถทำได้หลายทาง เช่น การเพิ่มคุณค่าทางต้นทุน (Cost Value) เป็นต้นทุนของชิ้นงานนั้นหรือผลิตภัณฑ์นั้น ดูว่ามีค่าใช้จ่ายอะไรบ้าง ตั้งแต่การผลิตจนไปถึงขนส่ง การเพิ่มคุณค่าทางจุดเด่น (Esteem Value) เป็นคุณค่าที่ทำให้ผลิตภัณฑ์นั้นมีจุดเด่นที่ต่างไปจากเดิม หรือมีคุณสมบัติพิเศษมากกว่าเดิมที่มีอยู่ การเพิ่มคุณค่าทางการใช้งาน (Use Value) เป็นคุณค่าที่ส่งผลต่อการใช้งานหรือมีประโยชน์ที่จะช่วยทำงาน แก้ไขปัญหาหรือช่วยบริการ

2.1 การวิเคราะห์หน้าที่

หน้าที่ (Function) หรืออาจเรียกว่าประโยชน์การใช้งาน หมายถึง สิ่งที่ทำให้ผลิตภัณฑ์ใช้งานได้และสามารถทำให้ผลิตภัณฑ์นั้นขายได้ด้วยรวมไปถึงความสามารถของชิ้นงานหรือผลิตภัณฑ์ที่นำไปใช้งานอีกด้วย ซึ่งแบ่งได้ออกเป็น 2 ประเภท คือ

1. หน้าที่พื้นฐาน (Basic Function) เป็นหน้าที่เป็นจุดเด่นของชิ้นส่วน หรือผลิตภัณฑ์นั้น โดยจะมีหน้าที่เพียงอย่างเดียวเท่านั้น

2.หน้าที่รอง (Secondary Function) เป็นหน้าที่เสริมของหน้าที่พื้นฐานให้เติมเต็มและมีความหลากหลายมากขึ้นโดยหน้าที่นี้จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่การการคิดค้นใส่เพิ่มเติมเข้าไป

วิศวกรรมคุณค่ามีวัตถุประสงค์หลัก คือ การวิเคราะห์หน้าที่การใช้งาน (Function Analysis) ของเนื้องานนั้น ไม่ว่าจะเป็นการใช้ประยุกต์อะไรก็ตาม วิศวกรรมคุณค่าจะช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายได้อย่างมาก นอกจากนี้วิศวกรรมคุณค่ายังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในด้านความปลอดภัย การอนุรักษ์พลังงาน การควบคุมและช่วยลดปัจจัยที่เกิดจากมนุษย์ (Human factors) ได้ด้วย วิศวกรรมคุณค่ายังสามารถช่วยให้เกิดการใช้ทรัพยากรได้อย่างมีประสิทธิภาพ ด้วยการกำจัดต้นทุนที่ไม่จำเป็นออกไปโดยไม่ทำให้คุณภาพลดลง

ในการดำเนินงานนั้นต้องมีแผนหรือขั้นตอนของการทำงาน โดยแผนงานของวิศวกรรมคุณค่านั้นได้มีการวางแผนได้ทุกขั้นตอน และการทำงานก็ต้องทำทีละขั้นตอนด้วย ถ้ามีการทำงานแบบก้าวกระโดดที่รวดเร็วจะมีโอกาสที่จะเกิดการผิดพลาดได้ ดังนั้นจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องรอบคอบในการทำงานที่กำหนดเป็นขั้นตอนที่ละขั้นตอนอย่างรอบคอบ

นอกจากการวิเคราะห์ด้วยวิศวกรรมคุณค่าแล้วเรายังสามารถใช้แผนงานวิศวกรรมคุณค่า 7 ขั้นตอนของ Authur E. Mudge (1989) ได้อีกด้วย ซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ขั้นตอนเลือกโครงการ (Project selection phase)

2. ขั้นตอนรวบรวมข้อมูล (Information phase)

3. ขั้นตอนวิเคราะห์หน้าที่ (Function phase)

4. ขั้นสร้างสรรค์ความคิด (Creation phase)

5. ขั้นประเมินผล (Evaluation phase)

6. ขั้นทดสอบพิสูจน์ (Investigation phase)

7. ขั้นเสนอแนะ (Recommendation phase)

ในวิธีการดำเนินงานนั้นสามารถสรุปหรืออธิบายเป็นขั้นตอนได้ดังนี้

1.ขั้นตอนการเลือกโครงการหรือการเตรียมโครงการ เป็นการเลือกเป้าหมายของโครงการที่จะทำ ซึ่งมีแผนที่จะทำอะไรออกมา หรือโครงการอะไร ซึ่งแบ่งได้ออกเป็น 2 ประเภทด้วยกัน คือ โครงการที่เกี่ยวกับลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ วัตถุดิบ รวมไปถึงสิ่งที่ช่วยให้โครงการเป็นไปด้วยความเรียบร้อย และโครงการที่เกี่ยวกับระบบการออกแบบการทำงาน การผลิต กระบวนการแปรรูป รวมไปถึงการวางแผนด้านการขาย ซึ่งในการเลือกโครงการที่จะทำ หรือผลิตอะไรนั้น จำเป็นต้องมีการการที่พิจารณาหลาย ๆ ด้านด้วยกัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.ขั้นตอนรวบรวมข้อมูล ถือว่าเป็นหัวใจในการทำงานทุกอย่าง ดังนั้นการรวบรวมข้อมูลถือว่าสำคัญมาก เพราะถ้าได้รับข้อมูลที่ไม่ถูกต้องจะส่งผลให้งานหรือโครงการมีความผิดพลาด การรวบรวมข้อมูลอาจจะหาข้อมูลได้จากการสอบถาม การทำแบบสำรวจความต้องการ การศึกษาปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต รวมไปถึงความต้องการของผู้ผลิต ซึ่งข้อมูลที่เป็นพื้นฐานของการออกแบบผลิตภัณฑ์ เช่น ต้นทุนของผลิตภัณฑ์ ข้อมูลพื้นฐานทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ ข้อจำกัดของผลิตภัณฑ์ การใช้งานของผลิตภัณฑ์ ปัญหาที่เกิดจากผลิตภัณฑ์ รวมไปถึงความต้องการของผลิตภัณฑ์ในอนาตดที่มีการเปลี่ยนแปลง

3.ขั้นตอนวิเคราะห์หน้าที่ เป็นการทำการวิเคราะห์การจัดประเภทหน้าที่ของผลิตภัณฑ์หรือการทำงาน การวิเคราะห์หน้าที่นั้นคือการอธิบายหน้าที่ ประเมินความสัมพันธ์ของหน้าที่ การพัฒนาทางเลือก ซึ่งจะมีผลต่อกำไรและการปรับปรุงต้นทุนกระบวนการผลิต เป็นต้น

4.ขั้นสร้างสรรค์ความคิด เป็นวิธีที่ออกแบบผลิตภัณฑ์มีหน้าที่การทำงานให้มีความหลากหลายมากขึ้น โดยใช้กระบวนการคิดแบบกลุ่มหรือการรวบรวมข้อมูลที่มีอยู่นำมาศึกษาความเป็นไปได้ของชิ้นงานให้มีความหลายหลายมากกว่าเดิม สร้างสรรค์ผลิตภัณฑ์นั้นอาจจะมีการตั้งคำถามไปในตัวถึงการตอบสนองในการออกแบบ เช่น ทำไมจึงต้องออกแบบเป็นรูปสัณฐานอย่างนี้ จะเป็นอย่างไรถ้าผลิตภัณฑ์นั้นใหญ่ขึ้น หนาขึ้น กว้างขึ้น เล็กลง หรือยาวขึ้นผลิตภัณฑ์ของเราน่าจะนำเอาไปทำไรได้อีก สามารถดึงดูดความสนใจของคนได้อย่างไรบ้าง เป็นต้น ซึ่งปัญหาเหล่านี้ล้วนจะเป็นแนวคิดที่ทำให้การออกแบบหรือการคิดผลิตภัณฑ์ใหม่เป็นข้อตั้งต้นสำหรับการทำชิ้นงานขึ้นมา ในการเพิ่มความคิดสร้างสรรค์อาจจะมีวิธีหรือแนวทางขั้นตอนได้หลากหลาย

5.ขั้นประเมินผล เป็นขั้นตอนที่มาจากการคิดสร้างสรรค์ เป็นการประเมินถึงความคิดต่างกันและแนวทางในการพยายามหาทางป้องกันค่าใช้จ่ายที่ไม่จำเป็น แต่ต้องคำนึงถึงคุณค่า ไม่ให้คุณภาพลดลงและความน่าเชื่อถือได้ ตัวอย่างการประเมินเช่น

5.1.การย่อยและรวมแนวความคิด เป็นกระบวนการที่ต่อเนื่องและค่อนข้างเร็ว โดยการนำแนวความคิดหลายแนวคิดมารวมหลอมเข้าด้วยกันและสามารถแก้ปัญหาทั้งหมดได้

5.2.หาต้นทุนของแนวของแนวความคิด เป็นการพัฒนาความคิดด้วยการหาต้นทุน ซึ่งสัมพันธ์กันของแต่ละความคิดหรือความคิดรวม เพื่อประเมินคุณค่าของแต่ละความคิด เมื่อได้คุณค่าออกมาทั้งในด้านต้นทุนและหน้าที่การทำงาน ก็จะสามารถแบ่งขีดความสามารถในเรื่องของคุณค่าได้

5.3.พัฒนาทางเลือก เป็นการมุ่งเน้นไปที่การทำงานของผลิตภัณฑ์ เป็นการสร้างแนวความคิดใหม่โดยเริ่มจากเริ่มต้น คือการไม่ยึดของเก่าในหน้าที่พื้นฐาน ซึ่งจะสามารถนำไปสู่การแก้ปัญหาได้

5.4.ประเมินผลด้วยการเปรียบเทียบ ต้องคำนึงไว้เสมอว่าทางเลือกของหน้าที่การทำงานที่ได้ได้พัฒนาขึ้น ต้องมั่นใจว่าสามารถทำได้ ต่อจากนั้นคือการนำมามาประเมินผลด้วยเทคนิคหรือปัจจัยอื่นทางเลือกนั้นที่ต้องเปรียบเทียบกัน จะมีทั้งข้อดี ข้อเสีย โดยไม่ให้ความรู้สึกมามีส่วนในกระบวนการคิด การประเมินผลด้วยการเปรียบเทียบไม่ได้ทำให้เกิดสมดุลเพียงอย่างเดียว แต่ทำให้เกิดขัดแย้งของ

ตัวมันเองมีความแตกต่าง โดยต้องหาทั้งในเชิงบวกและเชิงลบ เพื่อทำให้เกิดความสัมพันธ์ของผลรวมทั้งหมด

6.ขั้นทดสอบพิสูจน์ เป็นการทดสอบเพื่อให้แน่ใจว่าความคิดที่ผ่านการกลั่นกรองและประเมินมานั้นเป็นความคิดที่สามารถนำไปปฏิบัติได้และผลเป็นที่น่าพอใจ ผลที่ได้รับในขั้นตอนนี้ขึ้นอยู่กับความสามารถในการทำงานที่เกี่ยวข้องกับสิ่งแวดล้อมทั่วไปในทางสังคม เศรษฐศาสตร์ วิทยาศาสตร์และเทคนิคอื่น ต้องอาศัยความรู้และเทคนิคอย่างกว้างในประยุกต์ เป็นการพัฒนาให้ความรู้ในการพัฒนาสิ่งใหม่

7.ขั้นเสนอแนะ เป็นการกระตุ้นให้เกิดการทำงานในเชิงบวกและป้องกันการกระทำในเชิงลบ รวมไปถึงการเสนอการเปลี่ยนแปลง วัตถุประสงค์ของข้อเสนอจำเป็นต้องมีการวางแผนที่ดี เพื่อให้บรรลุเป้าหมาย โดยแผนงานที่ทำมาทั้งหมดอาจจะล้มเหลวได้ถ้าการเสนอแนะไม่เป็นผล ดังนั้นต้องมีการวางแผนในการเสนออย่างดี โดยรายงานที่เสนอควรประกอบด้วย เช่น การเสนอข้อมูลที่รวบรวมได้ทั้งหมด ทำตารางกำหนดการทำงานระยะเวลาในการปฏิบัติงาน ผู้ร่วมงานแผนภาพแสดงระบบการทำงาน ตารางการแสดงผล อัตราการลดต้นทุน เงินที่ประหยัดได้และค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน ข้อเสนอแนะ เพื่อการแก้ไขปรับปรุง รวมทั้งการเปรียบเทียบผลก่อนและหลังการปรับปรุง

2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับอิฐมอญ

ดิน เป็นวัตถุตามธรรมชาติที่เกิดขึ้นจากผลของการผุพังสลายตัวของหินและแร่ ซึ่งนุภาคของดินจะรวมตัวกันเข้าเกิดเป็นเม็ดดิน มีขนาดไม่เท่ากัน ขนาดเล็กที่สุดคืออนุภาคดินเหนียว อนุภาคขนาดกลางเรียกอนุภาคทรายแป้ง อนุภาคขนาดใหญ่เรียกว่า อนุภาคทรายเนื้อดิน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

1) อนุภาคขนาดดินเหนียว มีเส้นผ่าศูนย์กลาง เล็กกว่า 0.002 มิลลิเมตร
2) อนุภาคขนาดทรายแป้ง มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.05-0.002 มิลลิเมตร
3) อนุภาคขนาดทราย เส้นผ่าศูนย์กลาง 2.0-0.05 มิลลิเมตร

เมื่อเกิดการผสมกันจะทำให้เกิดเป็นดินซึ่งจะแบ่งออกเป็น 3 ประเภท

1.ดินเหนียว ประกอบด้วยอนุภาคขนาดดินเหนียวตั้งแต่ร้อยละ 40 ขึ้นไป เป็นดินที่มีเนื้อละเอียดในสภาพดินแห้งจะเกาะตัวกันเป็นก้อนแข็ง เมื่อเปียกน้ำแล้วจะมีความยืดหยุ่น สามารถปั้นเป็นก้อนหรือคลึงเป็นเส้นยาวได้ ลักษณะเหนียวติดมือ มีทั้งที่ระบายน้ำและอากาศได้อย่างดีและไม่ดี อีกทั้งยังสามารถอุ้มน้ำได้

2.ดินทราย เป็นดินที่มีอนุภาคขนาดทรายเป็นองค์ประกอบอยู่มากกว่าร้อยละ 85 เนื้อดินมีการเกาะตัวกันหลวม ๆ มองเห็นเป็นเม็ดได้

3.ดินร่วน เป็นดินที่เนื้อดินค่อนข้างละเอียดนุ่มมือในสภาพดินแห้งจะจับกันเป็นก้อนแข็งพอประมาณ ในสภาพดินชื้นจะยืดหยุ่นได้บ้าง เมื่อสัมผัสหรือคลึงดินจะรู้สึกนุ่มมือแต่อาจจะรู้สึกสากมืออยู่บ้างเล็กน้อย

ดินแต่ละชนิดจะมีองค์ประกอบของสารเคมีที่แตกต่างกันออกไป ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของภูมิศาสตร์แต่ละประเทศ ซึ่งต้องย้อนกลับไปดูว่าที่บริเวณนั้นก่อนหน้ามีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของหินมาจากอะไร เพราะการสลายหรือการลดขนาดของอนุภาคหินก็จะมีส่วนประกอบแร่ธาตุในดินด้วย โดยทั่วไปแร่ธาตุสารประกอบที่อยู่ในดินจะเป็นสารประกอบดังนี้

ซิลิกอนไดออกไซด์ (Silicon dioxide, SiO_2) หรือซิลิกอนเป็นสารประกอบระหว่างออกไซด์และซิลิกอนรวมตัวกัน มีลักษณะโครงสร้างเป็น ซิลิกอน1ตัวจับกับออกซิเจนด้วยพันธะคู่ 2 ตัว ซิลิกอนจะปรากฏอยู่ในสถานะรูปผลึกของควอตซ์ ซิลิกามีการจัดเรียงตัวแบบเตตระฮีดรอล (Tetrahedral) แบบตาข่าย 3 มิติแบบไม่รู้จบ โดยมีซิลิกอนเป็นอะตอมกลาง และล้อมรอบด้วย 4 อะตอมของออกซิเจนเป็น SiO_4 ซึ่งมีอะตอมของออกซิเจน

การแบ่งรูปแบบซิลิกาแบ่งได้ออกเป็น 2 แบบ คือ ซิลิกาผลึก (Crystalline Silica) และซิลิกาอสัณฐาน (Amorphous silica)

ซิลิกาผลึก (Crystalline Silica) เป็นซิลิกาที่พบในรูปแบบสินแร่ มีการจัดเรียงอะตอมของโครงสร้างอย่างมีระเบียบ และต่อเนื่อง มีรูปร่างเป็นระบบผลึกที่แน่นอนภายใต้ความดันปกติ มี 3 รูปแบบ คือ ควอร์ตซ์ (Quartz) เป็นรูปที่พบมากที่สุด อุณหภูมิเสถียรน้อยกว่า 870 องศาเซลเซียส ไทรดิไมท์ (Tridymite) อุณหภูมิเสถียรที่ 870-1,470 องศาเซลเซียส และคริสโตบาไลท์ (Cristobalite) อุณหภูมิเสถียรที่ 1,470 องศาเซลเซียส และหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 1,713 องศาเซลเซียส ผลึกทั้งสามรูปนี้สามารถเปลี่ยนไปมาระหว่างกันได้โดยการเพิ่มอุณหภูมิหรือลดอุณหภูมิ ซึ่งการเปลี่ยนแปลง (Inversion) นี้มี 2 รูปแบบ คือ แบบที่หนึ่งจะมีการจัดเรียงอะตอมภายในโครงสร้างใหม่ ส่วนแบบที่สองเป็นการเปลี่ยนแปลงแบบรวดเร็ว พันธะเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย แต่สามารถกลับคืนสภาพเดิมได้ ซึ่งผลึกทั้ง 3 ชนิด เป็นรูปแบบที่เกิดขึ้นในธรรมชาติ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ซิลิกาอสัณฐาน (Amorphous silica) เป็นซิลิกาที่เกิดจากสิ่งมีชีวิต (biogenic silica) และสามารถสังเคราะห์ขึ้นได้ มีลักษณะเป็นของแข็ง มีรูปไม่แน่นอน ไม่เป็นผลึก มีการจัดเรียงอะตอมภายในโครงสร้างไม่เป็นระเบียบ อาจอยู่ในรูปของไฮเดรต (Hydrate) หรือ แอนไฮเดรต (Anhydrate) มีพันธะหลายรูปแบบ

การสังเคราะห์จะสามารถสังเคราะห์ได้จากการให้ความร้อนจนมีสภาวะเป็นไอ และการตกตะกอนสารละลาย แบ่งเป็น 3 ประเภท ตามลักษณะผลิตภัณฑ์ที่เตรียมได้ ได้แก่ ซิลิกาแก้ว (Silica glass) เป็นของแข็ง ไม่มีรูพรุน ผลิตได้จากการหลอมเหลวผลึกซิลิกาอสัณฐานแล้วปล่อยให้เย็นตัว ซิลิกาเจล มีลักษณะแข็ง มีรูพรุนสูง มีโครงสร้างรูพรุนแบบเปิด และมีพื้นที่ผิวสูง และซิลิกาผง (Powder silica) เป็นซิลิกาที่เตรียมได้จากสภาวะกลายเป็นไอ และการตกตะกอนของสารละลาย

แคลเซียมออกไซด์ (Calcium oxide) เป็นผงสีขาว มีฤทธิ์เป็นด่าง กัดกร่อนได้ โดยจะผลิตจากการเผาวัสดุที่มีส่วนผสมของหินปูน (แคลเซียมคาร์บอเนต, $CaCO_3$) เป็นองค์ประกอบ อุณหภูมิมากกว่า 825 องศาเซลเซียส เรียกกระบวนการแคลซิเนชั่น (Calcination) และมีการปล่อยปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ออกมา แคลเซียมออกไซด์สามารถทำปฏิกิริยากับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อยู่ในอากาศ ระยะเวลาช่วงหนึ่งจะกลายเป็นแคลเซียมคาร์บอเนต ดังสมการ

$$CaCO_3\ (s) \leftrightharpoons CaO\ (s) + CO_2\ (g)$$

แคลเซียมออกไซด์ ใช้งานในด้านสิ่งแวดล้อม เช่น ใช้ในการบำบัดน้ำประปา น้ำเสีย หรือของเสียในอุตสาหกรรมใช้เป็นสารเคมีหลักในการบำบัดน้ำเสีย ใช้เป็นสารเคมีหลักในการผลิตน้ำประปาและการกลั่นน้ำทะเลเป็นน้ำจืด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

นอกจากนี้ในด้านการก่อสร้างใช้เป็นสารป้องกันการแยกตัวออกจากกัน (anti-stripping agent) และใช้เป็นสารตัวเติมในการทำยางแอสฟัลต์ ใช้ผสมในกระบวนการเพิ่มความสามารถในการรับน้ำหนักของทราย (Soil stabilization) ใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตปูนซีเมนต์ หรืออิฐมวลเบาใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตวัสดุประเภทแก้ว

อะลูมินัมออกไซด์ (Al_2O_3) หรืออะลูมินา พบในธรรมชาติในรูปของแร่คอรันดัม (corundum) เกิดจากการสลายของดินที่มีหินปูน เกิดในลักษณะตกตะกอนเป็นเม็ด ๆ อาจเกิดใน ที่โดยมาจากหินต้นกำเนิดโดยตรงหรือถูกพัดพามาสะสมในชั้นหินตะกอน โครงสร้างของอะลูมินา

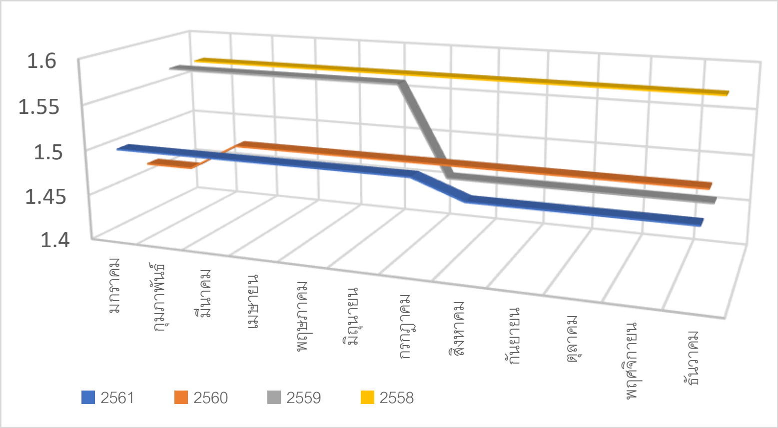
ประกอบด้วยพันธะระหว่างอะลูมิเนียมกับออกซิเจนที่มีความแข็งแรงมาก การทำลายพันธะต้องใช้พลังงานสูง ทำให้อะลูมินามีความแข็งมาก โดยวัสดุที่แข็งแรงมากกว่าอะลูมินามีเพียงเพชรเท่านั้น นอกจากนั้นแล้วอะลูมินาทนความร้อนและการกัดกร่อนจากสารเคมีได้ดี ประโยชน์ของอะลูมินาใช้เป็นส่วนผสมในผลิตภัณฑ์เซรามิกซ์ เพื่อให้เกิดความแข็งแรง มากขึ้นแล้ว สามารถนำไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีประโยชน์หลายชนิด เช่น ใช้ทำวัสดุทนไฟในเตาเผาอุตสาหกรรมเซรามิกซ์ ถ้วยเผาสาร (crucible) เป็นต้น

อิฐมอญ เป็นวัสดุก่อสร้างที่มีเอกลักษณ์คือสีแดง วัสดุก่อสร้างชนิดนี้มีมาตั้งแต่สมัยโบราณ มีส่วนประกอบของ คือ ดินเหนียว ทราย ขี้เถ้าแกลบ และน้ำ นำมาผสมกันและปั้นด้วยมือทีละก้อน ใช้สร้างวัด โบสถ์ เจดีย์ กำแพง แต่ในปัจจุบันอิฐมอญมีการดัดแปลงออกมาหลากหลายรูปแบบเพื่อให้สะดวกต่อการใช้งาน การอิฐมอญเริ่มผลิตมาจากการนำดินเหนียวมาอัดใส่แม่พิมพ์แล้วนำไปเผาที่ระบบเปิด ซึ่งอุณหภูมิไม่เกิน 700 องศาเซลเซียส เพื่อให้ได้วัสดุที่คงรูปและมีความแข็งแรง เป็นอิฐที่ใช้ในงานก่อสร้างมาหลายสิบปี เพราะมีคุณสมบัติพิเศษที่ความคงทนต่อสภาพอากาศทั้งร้อนชื้นของไทย ทนแดดทนฝนได้ดี จึงนิยมนำมาใช้กับงานผนังโดยเฉพาะบริเวณที่ใช้งานเฉพาะช่วงกลางวัน หรือบริเวณภายนอกบ้าน สามารถผลิตได้เองในประเทศไทยจึงราคาถูก ส่วนข้อเสียของอิฐมอญคือมีน้ำหนักเยอะ เมื่อนำไปก่อสร้างบ้านอาจทำให้อุณหภูมิในบ้านสูงขึ้นอีกด้วยด้วย เพราะอิฐมอญเป็นวัสดุที่สะสมความร้อน และจะถ่ายเทความร้อนเข้าสู่บริเวณที่อุณหภูมิต่ำกว่าทำให้ในบ้านมีอุณหภูมิสูง

รูปที่ 2.1 การจัดเรียงอิฐที่จะเผาในระบบเปิดสู่บรรยากาศ

ในการทำอิฐมอญจะมีข้อระมัดระวังเกี่ยวกับขั้นตอนการทำอยู่บ้าง คือในการทำส่วนผสมนิยมใช้ดินเหนียวในการทำเป็นวัตถุดิบหลัก ต้องระวังอย่างให้มีเศษหินหรือแคลเซียมคาร์บอเนตผสมลงไป จะทำให้ให้เกิดการแตกออกของอิฐเมื่อทำการเผาเสร็จ หรือเกิดรอยแยกของอิฐดังรูปที่ 2.2 (ซ้าย) รวมไปถึงเมื่อนำไปทดสอบความต้านแรงอัด อาจจะได้ค่าที่แตกต่างจากค่าอื่น หรือในขณะที่เผาอิฐมอญต้องมั่นใจว่าความร้อนที่เผานั้นได้ส่งไปถึงข้างในของอิฐ เพราะถ้าความร้อนเข้าไปไม่ถึงข้างในของอิฐจะทำให้เกิดการไม่เป็นเนื้อเดียวกันของอิฐและเกิดการแยกออกกันของอิฐดังรูปที่ 2.2 (ขวา)

รูปที่ 2.2 การปนของเม็ดหินในอิฐกับการเผาอิฐโดยที่ความร้อนเข้าไปไม่ถึงข้างใน



รูปที่ 2.3 ข้อมูลราคาอิฐมอญ (ราคาบาท/ก้อน)

จากรูปที่ 2.3 เป็นราคาของผลิตภัณฑ์อิฐก่อสร้างสามัญ มาตรฐานเลขที่ มอก.77-2545 ที่กำหนดโดยสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม แสดงให้เห็นราคาอิฐก่อสร้างย้อนหลังมีราคาอยู่ในช่วง 1.40-1.60 บาทต่อก้อน ซึ่งราคาแปรผันตามความต้องการและปริมาณการผลิตออกมา

2.3 มาตรฐานของอิฐมอญ

ผลิตภัณฑ์อิฐก่อสร้างสามัญหรืออิฐมอญได้มีสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรมได้กำหนดมาตรฐานของอิฐมอญ โดยใช้มาตรฐานเลขที่ มอก.77-2545 ซึ่งแบ่งประเภทของอิฐมอญที่ใช้ในอุตสาหกรรมไว้ 4 ประเภท แต่ละประเภทจะมีขนาดที่ต่างกันตามลักษณะการนำไปใช้งานดังตารางที่ 2.1 นอกจากนี้มาตรฐาน มอก.77-2545 ยังได้กำหนดลักษณะของความต้านแรงอัด และร้อยละการดูดซึมน้ำ ซึ่งได้แบ่งเกรดหรือชั้นของคุณภาพอิฐมอญออกเป็น 3 ช่วง คือ ชั้นคุณภาพ ก , ข และ ค ตามตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.1 การแบ่งประเภทของอิฐมอญตามขนาดมาตรฐาน

ประเภทอิฐ	**ขนาดมาตรฐาน (มิลลิเมตร)**		
	กว้าง	ยาว	หนา
1	65±3	140±5	40±2
2	90±3	190±5	40±2
3	90±3	190±5	65±2
4	90±3	190±5	90±2

ตารางที่ 2.2 มาตรฐานการแบ่งคุณสมบัติตามความต้านแรงอัดและร้อยละการดูดซึมน้ำ

ชั้นคุณภาพ	**ความต้านแรงกดต่ำสุด (เมกกะปาสคาล)**		**ร้อยละการดูดซึมน้ำสูงสุด (ร้อยละ)**	
	แต่ละก้อน	เฉลี่ย 5 ก้อน	แต่ละก้อน	เฉลี่ย 5 ก้อน
ก	17.0	21.0	20.0	17.0
ข	15	17.0	25.0	22.0
ค	9.0	10.0	ไม่กำหนด	ไม่กำหนด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.4 คุณสมบัติของวัสดุ

ในงานทางวิศวกรรมคุณสมบัติเชิงกลมีความสำคัญมาก เพราะการจะเลือกใช้วัสดุอย่างใดอย่างหนึ่งจำเป็นต้องพิจารณาถึงความปลอดภัยเป็นอย่างแรก ดังนั้นวัสดุที่นำมาใช้ต้องมีคุณสมบัติที่

ผ่านเกณฑ์ที่กำหนดหรือสามารถรองรับแรงที่กระทำจากภายนอกได้ ดังนั้นคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ (Mechanical Properties) จึงเป็นสิ่งที่สำคัญ

2.4.1 ความต้านแรงอัด (Compressive Strength)

โดยทั่วไปแล้วความสามารถในการรับแรงของวัสดุขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของวัสดุ โดยวัดจากแรงที่กระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ที่รองรับแรงในทิศตั้งฉาก คือ ความแข็งแรง (Strength) มีหน่วยเป็น ปอนด์ (PSI) หรือ นิวตันต่อตารางเมตร (N/m^2) ซึ่งการวัดความแข็งแรงที่นิยมวัด เช่น

1. ความแข็งแรงทางแรงดึง (Tensile Strength) คือ แรงที่มากระทำอยู่ในลักษณะการดึง (Tensile) ในแนวแรงตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัดของวัสดุทำให้วัสดุออกแรงต้านเพื่อไม่ให้เกิดการขาดออกจากกัน นิยมวัดกับวัสดุที่สามารถยืดได้ หรือวัสดุที่มีความยืดหยุ่น เช่น ยาง พลาสติก เป็นต้น

2. ความต้านแรงอัด (Compressive Strength) คือ แรงที่มากระทำอยู่ในลักษณะกดอัด (Compressive) ในแนวแรงตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัดของวัสดุ ทำให้วัสดุออกแรงต้านเพื่อไม่ให้เกิดการแตกหัก โดยการทดสอบจะทดสอบจนวัตถุเสียรูปทรง นิยมวัดกับวัสดุประเภทที่ใช้รองรับแรงจากภายนอกมากระทำ หรือวัสดุที่ต้องการทดสอบความแข็งแรง เช่น คอนกรีต อิฐ หรือวัสดุที่มีความแข็งเป็นต้น

3. ความแข็งแรงทางแนวเฉือน (Shear Strength) คือ แรงที่มากระทำอยู่ในลักษณะการเฉือน (Shear) แนวแรงจะขนานกับพื้นที่หน้าตัดของวัสดุ ทำให้วัสดุออกแรงต้านเพื่อไม่ให้ถูกเฉือนขาดออกจากกัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4. ความแข็งแรงในการรับแรงบิด (Torsion Strength) คือ ความสามารถของวัสดุในการต้านต่อการถูกบิดให้หมุนไปตามทิศทางของแรงที่มากระทำ นิยมทดสอบกับวัสดุที่มีลักษณะเป็นทรงกระบอกที่แข็งแรง

วัตถุจะสามารถรับแรงได้มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับค่าของความต้านแรงอัด ซึ่งเป็นค่าของแรงที่รองรับกระทำต่อพื้นที่หน้าตัด ดังนั้นค่าความต้านแรงอัดจึงถูกนำมาใช้เปรียบเทียบถึงการรับแรงกดในแนวตั้งฉาก ซึ่งถ้าวัตถุใดมีค่ามาก ก็จะสามารถรับแรงในแกนฉากได้มากเช่นกัน ในทางวิศวกรรมก็เช่นเดียวกัน ค่าของความต้านแรงอัด มีความสำคัญมาก เพราะเป็นค่าที่บ่งบอกถึงการรับน้ำหนักของแรงได้ของอาคารหรือตึก ดังนั้นค่าความต้านแรงอัด จึงเป็นค่าที่ต้องพิจารณาอย่างมาก ซึ่งหาได้จากดังสมการ

$$\text{Compressive Strength} = \frac{\text{Maximum load}}{\text{Cross section area}}$$

นอกจากนี้ยังมีการทดสอบคุณสมบัติทางฟิสิกส์ (Physical Properties) เป็นการทดสอบที่เกี่ยวข้องกับคุณภาพหรือลักษณะของเนื้อวัสดุ รวมไปถึงคุณสมบัติจำเพาะทางฟิสิกส์ของวัสดุ เช่น ค่าความพรุนตัว(apparent porosity) ค่าความหนาแน่น (Density) ค่าการดูดซึมน้ำ (Water absorption) และโครงสร้างการจัดเรียงของอนุภาค

2.4.2 การดูดซึมน้ำ (Water absorption)

ปริมาณน้ำที่สามารถดูดซึมเข้าไปภายในเนื้อวัสดุภายใต้สภาวะการทดสอบที่เฉพาะ เป็นตัวบอกถึงโครงสร้างของตัวดูดซับ โดยที่มีค่าการดูดซึมน้ำมากโครงสร้างของตัวดูดซับมีรูพรุนมาก แต่ถ้าตัวดูดซับมีการอัดตัวกันแน่นและมีการหลอมตัวมาก จะมีค่าการดูดซึมน้ำต่ำมีค่าความแข็งแรงสูง และมีน้ำหนักที่มาก ค่าการดูดซึมน้ำ จะเป็นตัวบอกถึงโครงสร้างเนื้อวัสดุว่ามีรูพรุนมากหรือน้อย วัสดุที่มีรูพรุนน้อยจะมีความแข็งแรงสูง มีน้ำหนักที่มาก สามารถนำไปใช้ในการรองรับน้ำหนักได้ดีกว่าวัสดุที่มีรูพรุนมาก ดังนั้นจึงพบว่าวัสดุที่ต้องการรองรับน้ำหนักในการกดทับมาก จะถูกกำหนดให้มีค่าการดูดซึมน้ำที่ต่ำ หรือมีรูพรุนที่น้อย เพื่อให้มีความแข็งแรงที่สูงเหมาะกับการใช้งาน การดูดซึมน้ำถือเป็นสิ่งที่แสดงคุณภาพของวัสดุ เช่นอิฐ ที่ดีจะต้องดูดน้ำประมาณ 10-17เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักของอิฐ สามารถหาได้จากสมการ

$$\text{เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของอิฐ} = \frac{W_w - W_d}{W_d} \times 100$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

เมื่อ W_w คือ เป็นน้ำหนักของวัสดุหลังจากที่แช่น้ำ (กรัม)

W_d คือ เป็นวัสดุที่อบแห้ง (กรัม)

การดูดซึมน้ำเป็นพารามิเตอร์สำคัญที่บ่งบอกถึงความทนทานของอิฐและเป็นตัวบ่งชี้ความพรุนที่เกิดขึ้น(El-Mahllawy, 2008)ยิ่งอิฐมีค่า Water absorptionน้อย จะทำให้อิฐมีความต้านต่อสภาพอากาศภายนอก ตามมาตรฐาน ASTM C62 อิฐไม่ควรมีค่า Water absorption เกิน 17% สำหรับความต้านต่อสภาพดินฟ้าอากาศที่รุนแรงและ 22% สำหรับความต้านต่อสภาพดินฟ้าอากาศปานกลาง (ASTM:C62-13a, 2013)

2.4.3 ค่านำหนักสูญเสียหลังเผา (Weight loss) เป็นค่าที่บ่งบอกถึงการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของวัตถุก่อนเผาและหลังเผา ซึ่งน้ำหนักที่หายไประหว่างเผาเกิดจากการสลายตัวของสารอินทรีย์หรือน้ำที่อยู่ในอิฐ ถ้าค่าน้ำหนักที่หายไปมีค่ามากบางบอกถึงวัตถุดิบที่นำมาทำอิฐว่ามีองค์ประกอบการอินทรีย์มาก และแสดงให้เห็นถึงความสารถในการอิฐไปใช้งานด้วย

2.4.4 ความหนาแน่น (Density) เป็นอัตราส่วนระหว่างปริมาณของมวลสารต่อหน่วยปริมาตร ซึ่งเป็นสมบัติเฉพาะตัวของสารแต่ละชนิด มีหน่วยในระบบ S.I. มีหน่วยเป็น กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ความหนาแน่นแบ่งออกเป็น

1.ความหนาแน่นรวม (Bulk density) เป็นความหนาแน่นของวัสดุปริมาณมวล (bulk material) ที่รวมที่ว่างระหว่างชิ้นวัสดุ นิยมใช้กับวัสดุที่มีขนาดเล็กซ้อนทับกันเป็นชั้นโดยมีอากาศหรือช่องว่างแทรกตัวอยู่ เช่น แป้ง ดิน ทราย เป็นต้น

2. ความหนาแน่นเนื้อ (Solid density) เป็นความหนาแน่นของชิ้นวัสดุแต่ละชิ้น ไม่รวมช่องว่างหรืออากาศระหว่างชิ้นวัสดุ ถือเป็นความหนาแน่นที่วัดจากเนื้อสารอย่างเดียว เช่น วัสดุที่มีลักษณะเป็นของแข็งหรือของเหลว เป็นต้น

ปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นคือ ความชื้น (moisture content) ซึ่งปริมาณ ไอน้ำอาจจะเข้าไปสอดแทรกระหว่างช่องว่างได้ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าได้ ดังนั้นในการทดลองจำเป็นต้องกำจัดความชื้นออกก่อนด้วยการอบ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

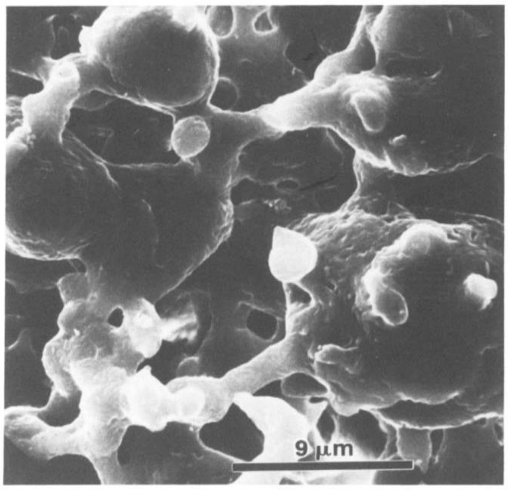
การเผาซินเทอร์ (Sintering) คือ กระบวนการที่ทำให้เนื้อวัสดุเกิดการเปลี่ยนโครงสร้างผลึกและอนุภาคของวัตถุดิบมีเชื่อมต่อกัน ในกระบวนการนี้ใช้อุณหภูมิสูงเพื่อให้อะตอมของสารเกิดการแพร่เข้าไปยึดเกาะกันแน่นมากขึ้น ทำให้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น การดูดซึมน้ำลดลง มีขั้นตอนการเกิด 3 ขั้นตอน คือ

1. initial stage เป็นการรวมตัวกันของอนุภาคที่ต่างชนิดกัน

2. intermediate stage เป็นการแยกตัวกันของอนุภาค ซึ่งจะทำให้เกิดการเสียรูปทรง รูพรุนจะเกิด การขยายตัวกระจายไปคนละทิศทาง

3. final stage เป็นการลดขนาดและหายไปของรูพรุน และมีการหดตัวของอนุภาคทำให้เกิดการยึดติดเพิ่มความหนาแน่นขึ้น

กระบวนการทั้งสามนี้จะเป็นการเพิ่มคุณสมบัติให้วัตถุมีโครงสร้างที่แข็งแรงมากขึ้น ซึ่งจะพบในกระบวนการที่เกิดขึ้นของโลหะที่เป็นองค์ประกอบ ส่วนมากพบในขั้นตอนที่ได้รับความร้อนที่สูง



รูปที่ 2.4 กระบวนการเกิดการยึดติดกันของอนุภาค (J.W. Nowok, 1990)

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.5.1 สัดส่วนของส่วนผสม

Chen, Zhang, Chen, Zhao, and Bao (2011) ได้นำเสนอสิ่งที่เหลือใช้จากอุตสาหกรรมเคมีมาเป็นส่วนประกอบในการทำอิฐ ซึ่งแร่เฮมาไทด์ (hematite tailings) ได้ถูกนำไปเป็นส่วนผสมของดินตะกอน (clay) และเถ้าลอย (fly ash) โดยสัดส่วนของการศึกษาอยู่ที่ 77–100%ของเฮมาไทด์ 0–15%ของดินตะกอน และ 0–8% ของเถ้าลอย พบว่าอัตราส่วนของ แร่เฮมาไทด์: ดินตะกอน: เถ้าลอย คือ 84: 10: 6 นำไปเผาที่อุณหภูมิ 980-1030 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง สามารถรองรับแรงอัดและค่าการดูดซึมของน้ำได้เท่ากับ 20.03-22.92 เมกะพาสคาล และ 16.54-17.93% ตามลำดับ และ Lingling, Wei, Tao, and Nanru (2005) ได้นำเสนออัตราส่วนของเถ้าลอยต่อดินเหนียวในการทำอิฐขนาด 220 x 112 x 65 มิลลิเมตรที่สัดส่วนต่างกัน ซึ่งเมื่อผสมสัดส่วนได้ตามที่กำหนดได้นำไปอบที่ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง นำไปเผาไฟที่อุณหภูมิ 1000, 1050 และ 1100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง พบว่าสัดส่วนที่เหมาะสมของเถ้าลอยต่อดินเหนียวคือ 70 : 30 เมื่อทดสอบความต้านแรงอัด (compressive strength) ได้ 16.9 เมกะพาสคาล วัดความหนาแน่น (density) ได้ 1490 kg/m^3 เมื่อนำไปทดสอบค่าการดูดซึมน้ำ (water absorption) ได้ 19% และ Menezes, Ferreira, Neves, Lira, and Ferreira (2005) ได้นำเสนอการนำเศษของหินแกรนิตที่ได้จากอุตสาหกรรมผลิตหินแกรนิต โดยได้นำเศษหินแกรนิตไปทำการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมี เพื่อดูองค์ประกอบที่อยู่ในหินรวมไปถึงดูสัดส่วนปริมาณ การจัดเรียงตัวอนุภาคที่อยู่ในหิน พบว่ามีแร่เฟลด์สปาร์ แคลไซด์ และไมกา ซึ่งมีคุณสมบัติ

เพิ่มความแข็งแรง เมื่อนำไปเป็นส่วนประกอบของการทำอิฐจะทำให้อิฐมีน้ำหนักเพิ่มขึ้น 35% ค่าการดูดซึมน้ำ (water absorption) เพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อนำไปทำเป็นแผ่นกระเบื้องเซรามิกซ์ เผาที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส พบว่าค่าการดูดซึมน้ำมีค่าน้อยกว่า 3% และ Lin (2006) ได้นำเสนอผลของตะกรันในเตาเผาขยะ (municipal solid waste incinerator) นำตะกรันที่ได้ไปผสมกับดินเหนียวที่ 0-40% แล้วนำไปขึ้นรูปเป็นอิฐที่ขนาด 50 mm(L) × 25 mm(W) × 50 mm(H) นำไปตากแดดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำไปเข้าเตาอบที่ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เผาที่อุณหภูมิ 800-1000 องศาเซลเซียส พบว่าตะกรันที่ 40% เผาที่ 1000 องศาเซลเซียส ให้ผลการรับแรงกดเท่ากับปริมาณของตะกรันที่ 0% การดูดซึมน้ำพบการเติมตะกรันลงไปช่วยให้ลดค่าการดูดซึมน้ำลดลง แต่เพิ่มความหนาแน่นของอิฐให้มีค่ามากขึ้น แต่การทดสอบการเผาที่ 1000 กับ 800 องศาเซลเซียสให้ผลต่างกันไม่มาก เพื่อประหยัดพลังงานต้นทุนจึงเหมาะกับการเผาที่ 800 องศาเซลเซียส

เห็นได้ว่าองค์ประกอบของสารประกอบที่เพิ่มเข้าไปในอิฐตะกอนจะเป็นการเพิ่มเพื่อให้อิฐมีคุณสมบัติด้านความแข็งแรง รองรับแรงอัดได้มาก ซึ่งสารประกอบจำพวกของ SiO_2 และ Al_2O_3 ดังนั้นในงานวิจัยจะเพิ่มคุณสมบัติดังกล่าวด้วยการเติมดินเหนียวลงไป เนื่องจากมีคุณสมบัติของสารประกอบที่ใกล้เคียงกัน

2.5.2 อุณหภูมิที่ใช้ในการเผา

Gencel (2015) ได้นำเสนอการทดลองผลิตอิฐดินเหนียวมวลเบาที่สามารถเพิ่มการถ่ายเทความร้อนได้ด้วยวิธีการเติมสารเติมแต่ง คือการเติมหินพัมมิสซึ่งเป็นหินภูเขาไฟที่เกิดจากการเย็นตัวของลาวา จากการเติมสารเติมแต่งลงไปในอัตราส่วน 1:1 เมื่อนำไปทำอิฐแล้วเผาที่อุณหภูมิ 900 กับ 1000 องศาเซลเซียส พบว่าความหนาแน่นลดลง โดยที่ความหนาแน่นของอิฐที่เผา 900 องศาเซลเซียส มีค่าน้อยกว่าที่เผาที่ 1000 องศาเซลเซียส ส่วนความพรุนตัวของอิฐทั้งสองไม่ต่างกันมาก เมื่อไปทดสอบการดูดซึมน้ำพบว่าอิฐที่อุณหภูมิสูงมีค่าการดูดซึมน้ำที่สูงมากว่าอิฐที่เผาที่อุณหภูมิต่ำ และเมื่อนำไปทดสอบความต้านแรงอัดได้ผลว่าอิฐที่เผาที่อุณหภูมิสูงรองรับแรงอัดได้มากกว่า เมื่อไปทดสอบหาค่าการนำความร้อนพบว่าให้ผลเชิงบวกแนวเดียวกับการทดสอบความต้านแรงอัด

งานวิจัยข้างต้นที่ได้กล่าวไปนั้น จะใช้ช่วงอุณหภูมิการเผาอยู่ที่ 800-1000 °C ค่าระยะของเวลาการเผาที่ 2 ชั่วโมง ซึ่งในการวิจัยที่ทำให้กำหนดอุณหภูมิอยู่ที่ 900-1100 °C และเวลาที่ใช้แช่อยู่ที่ 2 ชั่วโมง ซึ่งต้องพิจารณาถึงการคงตัวของรูปร่างวัตถุด้วย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

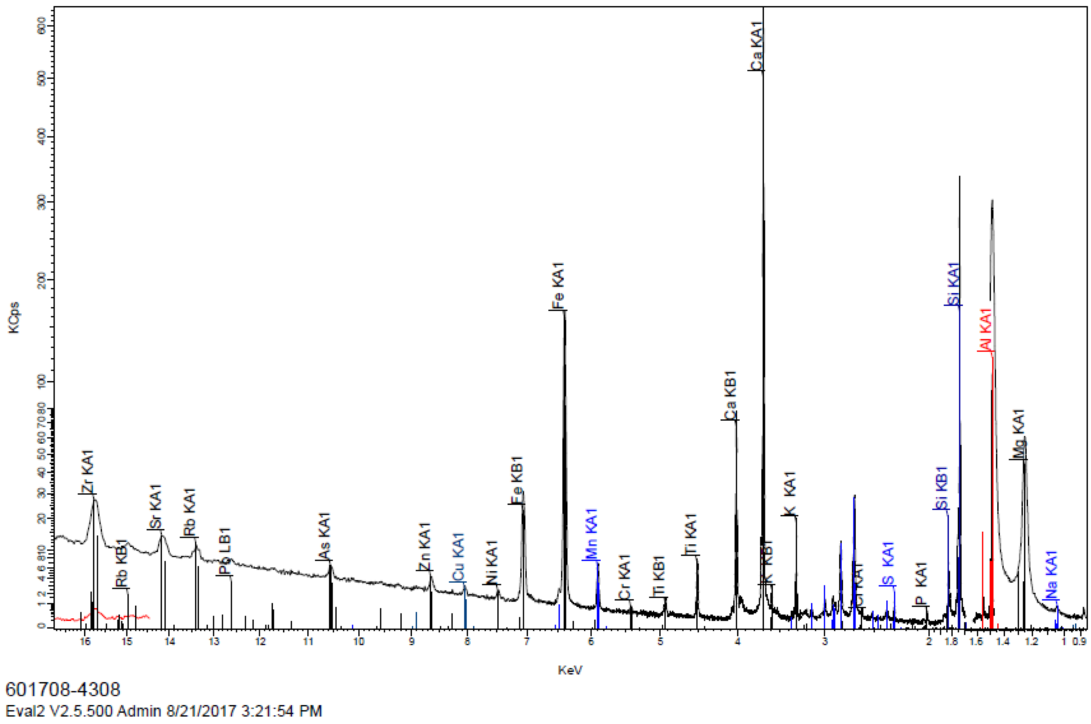
2.5.3 สารเติมแต่ง

Sutcu and Akkurt (2009) ได้นำเสนอเศษของกระดาษที่ได้จากอุตสาหกรรมการผลิตกระดาษมาเป็นส่วนผสมในการทำอิฐ ซึ่งใช้กระดาษที่เหลือในสัดส่วน 0-30% ของน้ำหนักอิฐ โดยทำการตีกระดาษผสมกับ ดินเหนียวเป็นเวลา 30 นาทีหลังจากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 16 ชั่วโมง นำไปเผาที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียสอีก 1 ชั่วโมง โดยให้อัตราการเพิ่มความร้อนอยู่ที่ 2.5 องศาเซลเซียสต่อนาที โดยอิฐที่ใช้ทำการทดสอบมีขนาด 85 mm x 85 mm x 10 mm ซึ่งให้ผลความหนาแน่นมีค่าลดลง 33% เมื่อเทียบกลับอิฐที่ไม่มีส่วนผสมของกระดาษ และค่าการนำความร้อนมีค่าน้อยกว่า 0.4 W/m K ซึ่งลดลงมากกว่าร้อยละ50ของอิฐที่ไม่มีส่วนผสมของกระดาษที่ 0.8 W/m K และDemir, Serhat Baspınar, and Orhan (2005) ได้นำเสนอเศษที่เหลือจากกระบวนการผลิตกระดาษคราฟท์ (Kraft Paper) มาเป็นส่วนประกอบของการผลิตอิฐ ซึ่งใช้อัตราส่วนการผสมที่ 0% , 2.5% , 5% และ 10% โดยนำมาขึ้นรูปเป็นก้อนสี่เหลี่ยมที่มีขนาด 25 x 25 x 150 mm นำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ซึ่งอัตราส่วนการผสมที่ 2.5-5% ให้ความพรุนของอิฐ และคุณสมบัติอื่นเป็นที่ยอมรับได้ ในเวลาถัดมาDemir (2006) ยังได้นำเสนอการใช้ประโยชน์ของชาที่ผ่านการบำบัด (processed waste tea: PWT) ร่วมกับดินเหนียวเพื่อผลิตอิฐ ซึ่งใช้อัตราส่วนการผสมที่ 0% , 2.5% และ5% โดยน้ำหนักขนาด 100 x 70 x 40 มิลลิเมตร โดยนำไปตากแห้งที่อุณหภูมิ 21 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 72 ชั่วโมง และนำไปอบที่ 105 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง พบว่าการใส่ PWTลงไปช่วยให้อิฐรองรับแรงอัดได้มากกว่าการไม่ใส่ PWT นอกจากนี้ช่วยให้ลดต้นทุนของการผลิตอิฐและลดมลพิษจากสิ่งแวดล้อม

จากงานวิจัยของ Chen et al. (2011) ได้นำส่วนผสมของเศษหินแกรนิตมาเป็นส่วนประกอบในการทำอิฐ พบว่าองค์ประกอบที่อยู่ในหินแกรนิตที่มีปริมาณของ SiO_2 และ Al_2O_3 ดังรูปที่ 2.5 มีปริมาณที่ไม่มากนัก ซึ่งใกล้เคียงกับปริมาณแร่ธาตุที่พบในเหมืองหิน ทำให้มีความเป็นไปได้ที่จะสามารถนำไปทำเป็นอิฐได้เช่นกัน

Composition	SiO_2	Al_2O_3	CaO	TFe	MgO	P_2O_5	K_2O	TiO_2	Na_2O
Hematite tailing	24.40	10.95	6.20	31.15	0.99	2.78	0.86	0.42	0.28
Clay	63.96	16.93	0.87	4.35	1.64	0.19	2.35	0.89	0.90
Fly ash	48.41	28.05	5.78	2.66	0.59	0.32	1.34	1.06	0.43

รูปที่ 2.5 ผลการวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบที่อยู่ในเศษของหินแกรนิต (Chen et al., 2011)



รูปที่ 2.6 ผลการวิเคราะห์ค่าความยาวคลื่นด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนต์ (X-ray Fluorescence Spectroscopy)

2.5.4 คุณสมบัติอื่น

จากงานวิจัยของ Martínez-Martínez et al. (2016) ได้ทำการศึกษาการทำดินเผาจากวัตถุดิบที่เหลือจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล ซึ่งวัตถุดิบที่เหลือกระบวนการผลิตนี้จะอยู่ในรูปของดินตะกอนและกลีเซอลีน ซึ่งได้นำไปผสมในสัดส่วนต่างกัน พบว่าปริมาณของกลีเซอลีน 5% ให้คุณสมบัติของการทดสอบแรงกดให้ค่าสูงสุด และสามารถลดค่าการนำไฟฟ้าได้ จากรูปที่ 2.6 พบว่าดินตะกอนที่นำมาเป็นสารปรุงแต่งในกระบวนการทำอิฐนั้นมีสัดส่วนขององค์ประกอบที่ใกล้เคียงกับดินตะกอนที่ได้จากอุตสาหกรรมการผลิตเหมืองหินโดยที่ปริมาณของ SiO_2 และ Al_2O_3 มากสุดตามลำดับ สอดคล้องกับงานวิจัยของ De Silva and Perera (2018) ได้ทำการศึกษาความเป็นฉนวนความร้อนและการป้องกันเสียงในอิฐดินเผา ได้ทำการทดสอบด้วยอิฐดินเผาที่มีอัตราส่วนการผสมของแกลบที่ปริมาณต่างกัน พบว่าที่ปริมาณแกลบ 0-4% ได้ลดการนำความร้อนและการป้องกันเสียงดีที่สุด ซึ่งปริมาณองค์ประกอบในรูปที่ 2.8 มีสัดส่วนของซิลิกอนไดออกไซด์ เท่ากับ 45.91% ซึ่งใกล้เคียงกับปริมาณของตะกอนที่มีซิลิกอนไดออกไซด์ในเหมืองหินที่เท่ากับ 39.5% เห็นได้ว่าแกลบและเถ้าลอยนั้นมีปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์มากที่สุดดังรูปที่ 2.7 และรูปที่ 2.8 การที่ผสมแกลบหรือ

เถ้าลอยลงไปเพื่อเป็นการเพิ่มสัดส่วนของปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์ให้มีปริมาณมากขึ้น โดยทั่วไปแล้วองค์ประกอบของสารที่จะมาทำอิฐประกอบด้วยสารที่มีคุณสมบัติที่แข็งแรง ทนแรงรับการกดกระแทรกได้สูงนั้นก็คือสารประกอบจำพวก SiO_2 , Al_2O_3 และFe_2O_3 เป็นต้น ดังนั้นเพื่อเป็นการเพิ่มปริมาณของ SiO_2 และ Al_2O_3 ให้มากขึ้นจึงอาจจะต้องมีการเติมแกลบลงไปในตะกอนซึ่งจะช่วยให้อิฐมีความแข็งแรงมากขึ้น

Oxide content (wt.%)	Clay
SiO_2	55.82
Al_2O_3	12.13
Fe_2O_3	4.83
MnO	0.03
MgO	1.49
CaO	9.21
Na_2O	0.49
K_2O	2.78
TiO_2	0.83
P_2O_5	0.12
LOI	11.50

รูปที่ 2.7 องค์ประกอบตะกอนด้วยเครื่อง XRF (Martínez-Martínez et al., 2016)

Chemical composition of RHA and clay.

Chemical properties	Percentage (wt%)	
	Clay	RHA
SiO_2	45.91	84.14
Al_2O_3	23.45	4.08
Fe_2O_3	10.55	1.15
CaO	1.84	0.97
MgO	1.26	0.44
Na_2O	1.83	1.69
SO_3	0.00	0.05
K_2O	1.48	1.34
Loss in ignition	13.66	6.13

รูปที่ 2.8 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบดินเหนียวและขี้เถ้าด้วยเครื่อง XRF (De Silva & Perera, 2018)

จากงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้น เห็นได้ว่ามีการนำเอาเศษหรือของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการอุตสาหกรรมมาเป็นส่วนประกอบของการขึ้นรูปทำเป็นอิฐ ซึ่งในงานวิจัยทั้งหมดจะทำการวิเคราะห์หาองค์ประกอบของสารประกอบและปริมาณที่มีอยู่เพื่อให้ทราบถึงการนำไปใช้งาน โดยที่องค์ประกอบหลักของการทำอิฐจะเป็นปริมาณของซิลิกอนไดออกไซด์ และอลูมิเนียมออกไซด์ ซึ่งมีคุณสมบัติใน

การรองรับแรงอัด นอกจากนี้ยังมีการใส่การบางอย่างเพิ่มเข้าไปเพื่อไปเพิ่มปริมาณของสารประกอบในลักษณะของการใช้งาน ดังนั้นเห็นได้ว่า ถ้าองค์ประกอบของสารประกอบมีน้อย จำเป็นต้องเพิ่มปริมาณของสารประกอบเข้าไป เพื่อให้สอดคล้องกับคุณสมบัติที่จะสามารถนำไปใช้งานได้

รูปที่ 2.9 ชนิดของการเปลี่ยนรูปร่างของข้าวชนิดต่างๆ (Sankar et al., 2016)

ในทางเทคนิควิศวกรรมคุณค่า ได้มีงานวิจัยได้นำเทคนิคนี้ไปใช้ในอุตสาหกรรมหลากลายชนิดเพื่อเพิ่มมูลค่าให้ผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าน้อยให้มีมูลค่ามากขึ้น เช่น Cheng and Rosentrater (2017) ได้นำเสนอความเป็นไปได้ของกระบวนการผลิตน้ำมันถั่วเหลืองด้วยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลายเฮกเซน (Hexane) โดยได้ทำการประเมินต้นทุนของการผลิต ความต้องการของตลาด รวมไปถึงผลกระทบของกำไรต่อต้นทุนการดำเนินงานที่แปรเปลี่ยนไป นอกจากนี้ยังมีปัจจัยหลายด้านที่เกี่ยวข้อง เช่น อัตราการเพิ่มขึ้นของเงินเฟ้อ ความผันผวนทางเศรษฐกิจที่ส่งผลให้ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานมีค่าสูงขึ้น รวมไปถึงความต้องการน้ำมันถั่วเหลืองในอุตสาหกรรมอาหาร ซึ่งเหล่านี้ล้วนเป็นสิ่งที่ส่งผลถึงการวางแผนหรือขยายการผลิตทั้งสิ้น และ Halaby, Ghoneim, and Helal (2017) ได้นำเสนอความเป็นไปได้และการเปรียบเทียบของการใช้พลังงานในอุตสาหกรรมการบำบัดน้ำเสีย ซึ่งพลังงานที่ใช้ในการเปรียบเทียบได้จากพลังงานทดแทนคือพลังงานแสงอาทิตย์เปรียบเทียบกับพลังงานที่ได้จากน้ำมันดีเซล ด้วยการวิเคราะห์ตัวแปรที่มีผลต่อศักยภาพของพลังงานทดแทน และต้นทุนการผลิตของระบบ นอกจากนี้ยังมีการเปรียบเทียบจุดคุ้มทุนของพลังงานทดแทนกับพลังงานหลักที่ใช้อยู่ นอกจากนี้ Leonzio (2017) ได้นำเสนอการออกแบบและวิเคราะห์ทางเศรษฐกิจและเศรษฐศาสตร์ของการเปลี่ยนการใช้พลังงานทดแทนเป็นแก๊สมีเทน โดยได้มีการวิเคราะห์หาจุดแข็งและจุดอ่อนรวมไปถึงโอกาสของธุรกิจ และปัจจัยเสี่ยงที่ส่งผลต่อความสำเร็จของโครงการ จากงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นเห็นได้ว่าการนำเทคนิคของวิศวกรรมคุณค่าไปใช้ในอุตสาหกรรมทำให้เกิดการลดต้นทุน และเพิ่มมูลค่าให้กับผลิตภัณฑ์ ซึ่งส่งผลให้อุตสาหกรรมมีการพัฒนาต่อไป จากข้างต้นได้ใช้เทคนิคการวิศวกรรมคุณค่าพบว่าเป็นขั้นตอนทีมีระบบอย่างชัดเจน และช่วยให้มีการทำงานเป็น

ขั้นตอน ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้นำขั้นตอนการทำงานด้วยเทคนิคการวิศวกรรมคุณค่า มาใช้ในกระบวนการทำงานอย่างเป็นขั้นตอนเพื่อเพิ่มความเป็นระบบของทดลอง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 3
วิธีการดำเนินงาน

3.1 การออกแบบทดลอง

ได้กำหนดตัวแปรและปัจจัยที่เกี่ยวข้องของการออกแบบการทดลอง คือ

ตัวแปรต้น

1.อุณหภูมิในการเผา 900 , 1000 , 1100 องศาเซลเซียส ซึ่งในการทำอิฐมอญจะใช้การเผาในระบบเปิด ทำให้อุณหภูมิในระปิดสู่บรรยากาศมีช่วงที่ไม่เกิน 700 องศาเซลเซียส ดังนั้นในการทดลองได้กำหนดช่วงที่ใช้ในเตาเผาที่มากกว่า 900 องศาเซลเซียส เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบกับคุณสมบัติอิฐดินเผา

จากการทดลองพบว่าการเผาตะกอนที่ได้จากเหมืองที่อุณหภูมิมากกว่า 1150 องศาเซลเซียสทำให้ตะกอนเสียสภาพของการขึ้นรูปดังตัวอย่างในรูปที่ 3.1 ส่งผลให้อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองต้องไม่เกิน 1150 องศาเซลเซียส ดังนั้นในการทดลองจึงใช้อุณหภูมิสูงสุดที่ 1100 องศาเซลเซียส

รูปที่ 3.1 การเสียรูปทรงของตะกอนที่ได้เผาที่ 1150 องศาเซลเซียส

2.ปริมาณตะกอน 40, 50, 60, 70 และ80 ร้อยละโดยน้ำหนัก ในการทดลองทำการเปรียบเทียบปริมาณของตะกอนที่มีผลต่อคุณสมบัติของอิฐดินตะกอนจากเหมืองหิน ดังนั้นจึงได้กำหนดปริมาณของตะกอนที่มีความต่างกันในช่วงที่กำหนด โดยจากการทดลองพบว่า

ปริมาณตะกอนที่ 90 เปอร์เซ็นต์ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นก้อนได้ และเมื่อทำการเผาพบรอยแตกและการเสียสภาพเนื่องจากไม่สามารถยึดติดของตัวตะกอนได้

ตัวแปรควบคุม

1. แรงที่อัดในการขึ้นรูปใช้ค่าสูงสุดที่ $1x10^6$ นิวตัน ในกระบวนการอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องกดไฮดรอลิก (Hydraulic press) เป็นการใช้แรงกดลงพื้นที่ต่อตารางหน่วย ซึ่งค่าที่ใช้เท่ากับ $1x10^6$ นิวตัน เป็นค่าสูงสุดที่ทำการอัดได้ โดยในการทดลองกำหนดค่าของแรงกดให้คงที่ตลอดการทดลอง

2. ขนาดของแม่พิมพ์ที่ใช้กว้าง 50 มิลลิเมตร ยาว 50 มิลลิเมตร และหนา 25 มิลลิเมตร เนื่องจากในงานวิจัยนี้เป็นส่วนการวิเคราะห์ในการทดลองไม่ใช่ในระบบอุตสาหกรรมที่มีขนาดหลากหลายตามลักษณะของการใช้งานที่แตกต่างกันออกไป จึงได้กำหนดขนาดของผลิตภัณฑ์ให้ขนาดดังกล่าว ซึ่งหากไปทำในระบบของอุตสาหกรรมก็จะสามารถทำได้โดยใช้ข้อมูลที่อ้างอิงจากการทดลองในห้องปฏิบัติการ

ตัวแปรตาม ทดสอบคุณสมบัติ

1. ความหนาแน่น

2. อัตราการดูดซึมน้ำ

3. ความต้านแรงอัด

4. การสูญเสียน้ำหนัก

5. โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

จากการกำหนดปัจจัยที่เกี่ยวข้องได้ทำการออกแบบตารางการทดลองที่กำหนดสัดส่วนของตะกอนและอุณหภูมิในการเผาออกมาเป็นตารางที่ 3.1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 3.1 การกำหนดปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการทดลอง

ร้อยละน้ำหนักโดยมวลของตะกอน	อุณหภูมิที่ทำการเผา (องศาเซลเซียส)		
	900	1000	1100
0			
40			
50			
60			
70			
80			

3.2 วิธีการทดลอง

3.2.1การจัดเตรียมวัตถุดิบการทดลอง

1. ดินตะกอนจากเหมือง

นำดินตะกอนที่ได้จากเหมืองมาตากให้แห้ง สังเกตว่ามีการปนเปื้อนของสิ่งเจอปนอย่างอื่นหรือไม่ เช่น เม็ดหินขนาดใหญ่ เศษหญ้า เป็นต้น ถ้ามีควรแยกเอาสิ่งปนเปื้อนออก จากนั้นนำมาบดให้ละเอียดด้วยball mill แล้ว

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 3.2 การเปลี่ยนขนาดของตะกอนจากเหมืองให้มีขนาดเล็กลง

2. ดินเหนียว

นำดินเหนียวมาทำการบดให้ละเอียดด้วยเครื่องบด ball mill

รูปที่ 3.3 เปลี่ยนขนาดของดินเหนียวให้มีขนาดเล็กลง

3.3 การทดลอง

3.3.1 นำดินตะกอนและดินเหนียวที่เตรียมไว้มาชั่งน้ำหนัก เตรียมในอัตราส่วนผสมต่างกัน โดยอัตราส่วนผสมของตะกอนต่อดินเหนียวที่ใช้ในการทดลองในครั้งนี้ คือ 0, 40, 50, 60, 70 และ80 ร้อยละโดยน้ำหนัก

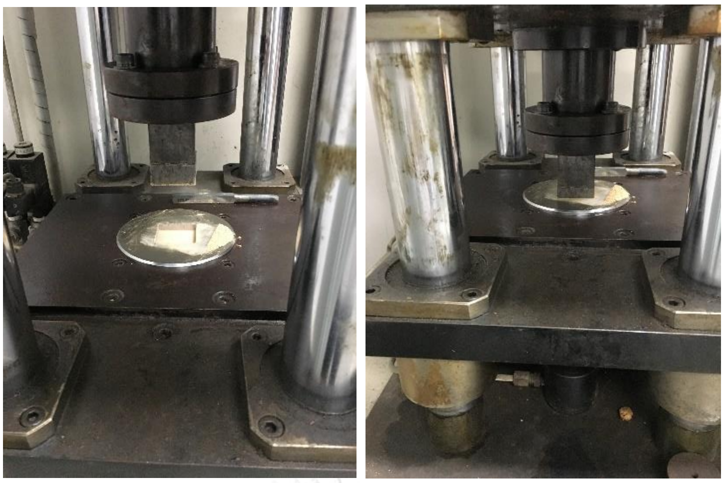
รูปที่ 3.4 การเตรียมตะกอนจากเหมืองและดินเหนียวที่สัดส่วนการผสมต่างกัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

3.3.2 นำดินตะกอนตัวอย่างและดินเหนียวที่เตรียมไว้มาผสมกัน ตามอัตราส่วนดังกล่าวมาคลุกเคล้าให้เข้ากัน

3.3.3 เติมน้ำลงไปในปริมาณ 2%ของน้ำหนัก โดยเติมทีละน้อยคลุกเคล้าให้เข้ากันจนกว่าดินตะกอนและดินเหนียวเป็นเนื้อเดียวกัน

3.3.4 นำดินที่ผสมแล้วมาขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก ขนาดแรงที่กดเท่ากับ $1x10^6$ นิวตัน ในแบบพิมพ์ขนาดกว้าง 50 มิลลิเมตร ยาว 50 มิลลิเมตร หนา 25 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.5 การขึ้นรูปของดินตะกอนและดินเหนียวที่ผสมกันด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก ในขณะลงพิมพ์

3.3.5 นำก้อนตัวอย่างมาตากที่อุณหภูมิห้อง 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำไปตากแดดเป็นเวลา 2 วัน

รูปที่ 3.6 ตะกอนจากเหมืองและดินเหนียวที่ผ่านการอัดการขึ้นรูป

3.3.6 ทำการวัดขนาดความกว้าง ยาว และหนา พร้อมทั้งชั่งน้ำหนักก้อนตัวอย่าง แล้วบันทึกค่าไว้

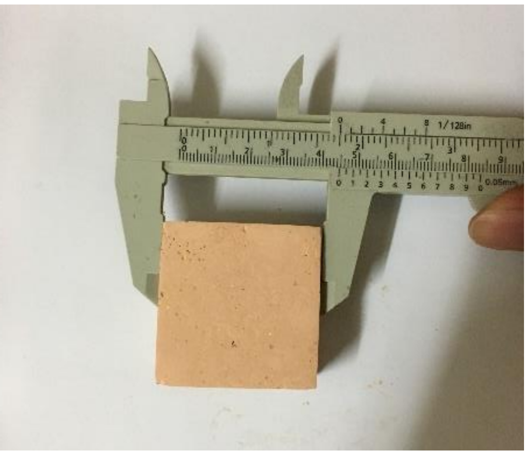
CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 3.7 การวัดขนาดของอิฐที่ผ่านการขึ้นรูปก่อนทำการเผาที่อุณหภูมิสูง

3.3.7 นำไปเผาให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 900 , 1000 และ 1100 องศาเซลเซียส ให้อัตราความร้อนเพิ่มขึ้น 5 องศาเซลเซียสต่อนาที หลังจากนั้นให้ความร้อนคงที่เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง

รูปที่ 3.8 เตาเผาที่ใช้เอาอิฐดินเผาที่ 900 -1100 องศาเซลเซียส

3.3.8 ทำการวัดขนาดความกว้าง ยาว และหนา พร้อมทั้งชั่งน้ำหนักก้อนตัวอย่างแล้วบันทึกค่าไว้



รูปที่ 3.9 การวัดขนาดของอิฐที่ผ่านการขึ้นรูปหลังทำการเผาที่อุณหภูมิสูง

3.4 วิธีการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลและเชิงกายภาพ

3.4.1 ความหนาแน่น

1. นำอิฐเผาไปอบให้แห้งสนิทที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วนำไปชั่งหาค่าน้ำหนัก (A) จดบันทึกค่าน้ำหนักแห้งไว้

2. นำอิฐเผาไปวัดหาขนาดของความกว้าง ความยาว และความสูง คำนวณหาปริมาตรของอิฐเผา (B) จดบันทึกปริมาตรของอิฐเผาไว้

3. นำค่าที่บันทึกได้มาคำนวณตามสมการ เพื่อหาค่าความหนาแน่นที่ได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

$$\text{Density} = \frac{A}{B}$$

3.4.2 อัตราการดูดซึมน้ำ

1. นำอิฐเผาที่เตรียมไว้มาอบให้แห้งในตู้อบที่อุณหภูมิ 110±5 องศาเซลเซียส ปล่อยทิ้งไว้ให้เย็นประมาณ 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิปกติ แล้วจึงนำไปแช่น้ำในภาชนะที่เตรียมไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

2. นำตัวอย่างขึ้นจากน้ำวางบนผ้าซับน้ำแล้วเช็ดตัวอย่างด้วยผ้าซับน้ำจนไม่มีน้ำเคลือบอยู่บนผิว (Visible Film) ของตัวอย่างแล้วทำการชั่งหามวลทันที โดยระวังไม่ให้มีการระเหยในระหว่างการเช็ดผิววัสดุให้แห้งและการชั่งมวลตัวอย่าง บันทึกเป็นค่า B หน่วยเป็นกรัม

3. นำตัวอย่างไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 110±5 องศาเซลเซียส แล้วปล่อยให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้อง นำไปชั่งหามวล โดยมวลที่ได้เป็นมวลวัสดุอบแห้ง บันทึกเป็นค่า A หน่วยเป็นกรัม

$$\text{Water Absorption (\%)} = \frac{B - A}{A} \times 100$$

เมื่อ A คือ มวลตัวอย่างอิฐเผาในสภาพอบแห้ง หน่วยเป็นกรัม

B คือ มวลตัวอย่างอิฐเผาในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง หน่วยเป็น

3.4.3 ความต้านแรงอัด

1. เตรียมชิ้นงานที่แห้งปราศจากความชื้น จากนั้นวัดขนาดของชิ้นงาน แล้วบันทึกค่าไว้

2. นำชิ้นงานไปวัดค่าความต้านแรงอัด ด้วยเครื่องทดสอบกำลังรับแรงกด (Universal Testing Machine)

3.4.4 การสูญเสียน้ำหนัก

1. นำอิฐที่ได้จากการขึ้นรูปไปชั่งน้ำหนักก่อนเผา บันทึกค่าน้ำหนักไว้เป็นค่า A หน่วยเป็นกรัม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

2. นำอิฐที่ผ่านการเผาแล้ว นำไปชั่งน้ำหนักหลังจากเผาเสร็จเรียบร้อย บันทึกค่าไว้เป็น B หน่วยเป็นกรัม

$$\text{Weight Loss (\%)} = \frac{B - A}{A} \times 100$$

3.4.5 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

1. เตรียมชิ้นงานที่แห้งปราศจากความชื้น

2. นำชิ้นงานไปส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด

3.5 ทำการประเมินคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์และวิเคราะห์ผลจากการทดสอบคุณสมบัติเชิงกล

3.5.1 ทำการหาราคาอ้างอิงที่ใช้ประเมินค่าใช้จ่าย ได้แก่ ค่าแรงงาน ค่าขนส่ง และค่าสาธารณูปโภค

3.5.2 ทำการหาราคาอ้างอิงเครื่องจักรที่ใช้ในกระบวนการผลิตอิฐ

3.5.3 ทำการคำนวณราคาของอิฐและเปรียบเทียบราคาต้นทุนของอิฐที่สัดส่วนการผสมตะกอนต่าง ๆ กัน

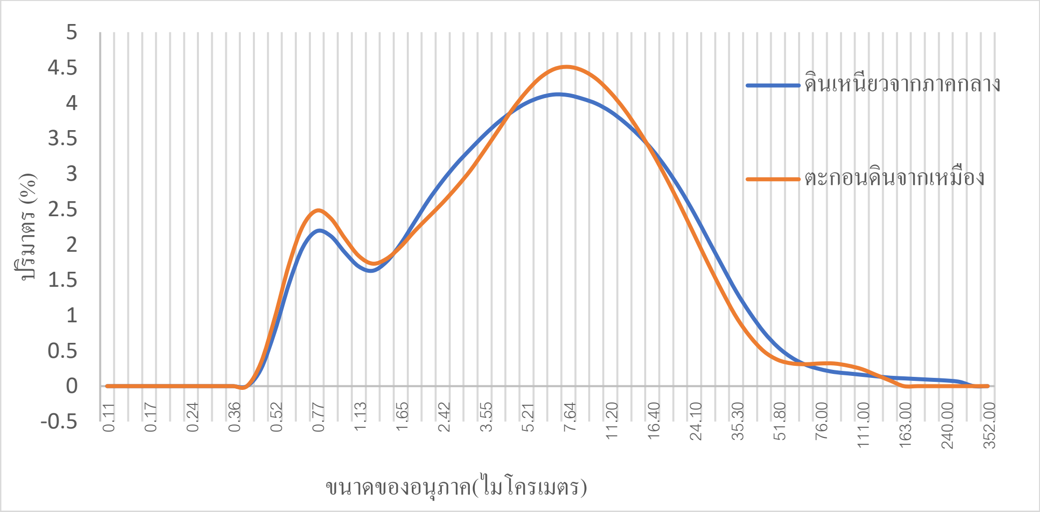
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 4
ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

การวิเคราะห์คุณสมบัติองค์ประกอบของตะกอนที่ได้จากเหมืองในจังหวัดชุมพร ประเทศไทย และทำการวิเคราะห์ดินเหนียวที่ใช้เป็นส่วนผสม เพื่อให้ทราบถึงองค์ประกอบที่อยู่ในดินตะกอนแล้วนำไปทำการเปรียบเทียบกับองค์ประกอบของสารประกอบที่อยู่ในอิฐมอญ ดูความแตกต่างเชิงปริมาณและคุณสมบัติที่ต่างกัน รวมไปถึงการเพิ่มสารประกอบเข้าไปเพื่อให้คุณสมบัติที่ทดแทนกันได้

4.1 การวิเคราะห์หาขนาดของอนุภาคของสารตั้งต้นของตะกอนจากเหมืองและดินเหนียว

การวิเคราะห์หาขนาดของอนุภาคของสารตั้งต้น เพื่อวัดขนาดและการกระจายตัวของตัวอย่างที่มีลักษณะเป็นผง ด้วยเครื่อง Laser particle size distribution analyzer รุ่น MALVERN, Mastersizer 3000 การวิเคราะห์พบว่าขนาดของดินตะกอนที่ได้จากเหมืองและดินเหนียวที่ได้จากภาคกลางพบว่าดินทั้งสองมีขนาดของอนุภาคที่ไม่ต่างกันอยู่ในช่วง 3.55-16.40 ไมโครเมตร ทำให้สามารถนำไปผสมกันได้ เพื่อให้ได้เป็นดินตะกอนผสมในรูปที่ 4.1

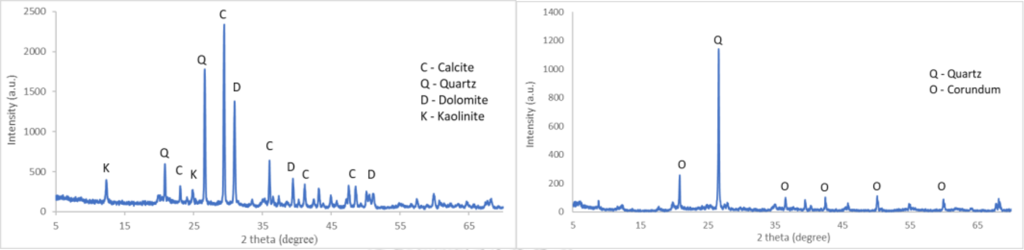


รูปที่ 4.1 ขนาดของอนุภาคของตะกอนดินจากเหมืองและดินเหนียวจากภาคกลาง

4.2 การวิเคราะห์หาองค์ประกอบของสารตั้งต้นของตะกอนในเหมืองหินและดินเหนียว

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน หรือ เทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ เพื่อหาองค์ประกอบทางเคมีของสารตัวอย่าง ด้วยเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟกซ์โตรมิเตอร์รุ่น D8-Discover จากรูปที่ 4.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบของดินตะกอนจากเหมืองและดินเหนียวมีสารประกอบที่เป็นสาประกอบหลัก คือ ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2), แคลเซียมออกไซด์ (CaO),

อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3), ไอรอนออกไซด์ (Fe_2O_3) ซึ่งสารประกอบหลักมีคุณสมบัติในเรื่องความแข็งแรง การรองรับแรงอัด และการเปลี่ยนแปลงของสีหลังจากได้รับความร้อน เป็นต้น การวิเคราะห์ด้วยเทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ จะได้ข้อมูลที่เป็นประเภทของสารประกอบเพียงอย่างเดียวจึงจำเป็นต้องทำการวิเคราะห์หาปริมาณของสารประกอบต่อไป



รูปที่ 4.2 กราฟการวิเคราะห์ที่ได้จากเครื่องเอ็กซ์เรย์-ดิฟแฟกซ์โตรมิเตอร์ของตะกอนดินจากเหมือง (ซ้าย) และดินเหนียวจากภาคกลาง (ขวา)

ตารางที่ 4.1 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันและเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์

สารประกอบ	ร้อยละของตะกอนที่ได้จากเหมือง	ร้อยละของดินเหนียว
ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2)	39.5	61.5
แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	26.5	0.562
อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3)	12	18.3
ไอรอนออกไซด์ (Fe_2O_3)	1.91	6.52
โพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O)	0.695	2.64
ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2)	0.422	0.993
แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	4.41	1.21
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3)	-	0.184
ฟอสฟอรัสเพนตะออกไซด์ (P_2O_5)	-	0.137
แมงกานีสไดออกไซด์ (MnO)	-	0.125
อื่น ๆ	14.563	7.829

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.3 การวิเคราะห์หาปริมาณของสารตั้งต้นจากตะกอนในเหมืองหินและดินเหนียว

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ (X-ray Fluorescence Spectroscopy) ด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนต์มิเตอร์ (X-Ray Fluorescence Spectrometer) เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณธาตุองค์ประกอบในสารตัวอย่าง รุ่น S8 Tiger จากตารางที่ 4.1 พบว่าดินตะกอนจากเหมืองมีองค์ประกอบดังนี้ SiO_2 39.5%, CaO 26.5% , Al_2O_3 12.0% , MgO 4.41% , Fe_2O_3 1.91% และสารประกอบอื่น ส่วนดินเหนียวจะมี SiO_2 39.5%, Al_2O_3 18.0% , Fe_2O_3 6.52% เห็นได้ว่าปริมาณของซิลิกอนไดออกไซด์และอลูมิเนียมออกไซด์ในตะกอนมีน้อยกว่าในดินเหนียว ซึ่งซิลิกอนไดออกไซด์และอลูมิเนียมออกไซด์เป็นสารประกอบที่มีคุณสมบัติในการรองรับแรงอัด ทำให้ตะกอนจากเหมืองไม่สามารถนำไปทำเป็นอิฐได้ เพราะปริมาณที่เหมาะสมของซิลิกอนไดออกไซด์ที่จะไปทำอิฐมีค่า 60-80% ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องเอาดินเหนียวผสมกับดินตะกอนเพื่อเพิ่มสารประกอบดังกล่าว

4.4 การวิเคราะห์หน้าที่ (Function) ของตะกอนเพื่อใช้เป็นองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์

จากดินตะกอนที่เหลือจากกระบวนการทำเหมืองหินพบว่ามีองค์ประกอบดังที่กล่าวไปข้างต้น ซึ่งมีปริมาณของสารประกอบที่ต่างกันออกไป แต่ละชนิดมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันออกไปดังต่อไปนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 4.2 หน้าที่ของสารที่เป็นองค์ประกอบชนิดต่าง ๆ

สารประกอบ	หน้าที่
SiO_2	ลดการหดตัวของโครงสร้าง เพิ่มความแข็ง (Hardness) และความแข็งแรง (Strength) ลดการนำเสียง (De Silva & Perera, 2018)
CaO	ลดสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน ช่วยยึดติดหรือเป็นตัวประสาน (Sintering)ระหว่างอนุภาค (El-Mahllawy, 2008; Sakhare & Ralegaonkar, 2016; Shih, Wu, & Chiang, 2004)
Al_2O_3	เพิ่มความทนไฟ ทนความร้อน และทนการกัดกร่อนจากสารเคมีและธรรมชาติ (Alonso-Santurde, Coz, Viguri, & Andrés, 2012; Bories, Aouba, Vedrenne, & Vilarem, 2015; Naganathan, Mohamed, & Mustapha, 2015)
Fe_2O_3	เพิ่มสีแดงปนส้มให้กับผลิตภัณฑ์และต้านทานจากแสงแดด (Shakir, Naganathan, & Mustapha, 2013)
MgO	ช่วยยึดติดหรือเป็นตัวประสานระหว่างอนุภาค (Espuelas, Omer, Marcelino, Echeverría, & Seco, 2017)
K_2O	เคลือบเซรามิกซ์ให้ทนการการขูดขีด และลดการดูดซึมน้ำ มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวต่ำ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จากงานวิจัยข้างต้นพบว่าสารประกอบแต่ละชนิดมีคุณสมบัติที่ต่างกัน ในงานวิจัยนี้จึงทำการวิเคราะห์หาองค์ประกอบหลักของสารประกอบที่อยู่ในอิฐทั่วไป ซึ่งการเพิ่มสารประกอบแต่ละชนิดลงไปในผลิตภัณฑ์ให้ค่าของคุณสมบัติที่ต่างกันไป ดังนั้นถ้าต้องการเพิ่มคุณสมบัติในด้านไหนจำเป็นต้องเพิ่มสารประกอบชนิดนั้นลงไป ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ให้ความสำคัญกับผลิตภัณฑ์ที่เป็นอิฐดินตะกอนจากเหมืองหิน ซึ่งต้องมีคุณสมบัติในเรื่องของความต้านแรงอัด จึงได้เพิ่มปริมาณของซิลิกอนไดออกไซด์และอลูมิเนียมออกไซด์ลงไป ซึ่งการเพิ่มสารประกอบเหล่านั้นลงไปคือการนำดินเหนียวที่ใส่ลงไปผสมกับดินตะกอนจากเหมืองจะส่งผลให้ปริมาณของสารประกอบเพิ่มมากขึ้น

4.5 การวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยการทดสอบคุณสมบัติเชิงกล (Analysis of mechanical properties)

ผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการขึ้นรูปจำเป็นต้องทดสอบหาคุณสมบัติเชิงกลเพื่อตรวจสอบพารามิเตอร์ที่จำเป็นก่อนนำไปผลิตใช้งานในอุตสาหกรรม ดังนั้นในการทดสอบจะได้ค่าของคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ออกมา ซึ่งจะนำไปวิเคราะห์ถึงการตัดสินใจในการเลือกเงื่อนไขของการผลิตในระบบอุตสาหกรรมต่อไป

ตารางที่ 4.3 ผลของการทดสอบคุณสมบัติเชิงกล

Treatment (residues: clay)	Physical Properties	Temperature (°C)		
		900	1000	1100
1 (0:100)	Compressive strength (MPa)	21.25	24.59	26.05
	Water absorption (%)	8.66	8.63	8.05
	Bulk density (g/cm^3)	1.46	1.48	1.51
	Weight loss (%)	11.82	11.83	12.87
2 (40:50)	Compressive strength (MPa)	24.15	33.30	35.24
	Water absorption (%)	12.75	11.89	10.70
	Bulk density (g/cm^3)	1.40	1.41	1.42
	Weight loss (%)	14.14	14.83	16.02
3 (50:50)	Compressive strength (MPa)	26.69	42.50	43.21
	Water absorption (%)	13.90	12.99	12.34
	Bulk density (g/cm^3)	1.40	1.40	1.40
	Weight loss (%)	15.34	15.74	17.26
4 (60:40)	Compressive strength (MPa)	27.33	43.56	43.67
	Water absorption (%)	15.64	13.52	11.53

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Treatment (residues: clay)	Physical Properties	Temperature (°C)		
		900	1000	1100
	Bulk density (g/cm^3)	1.37	1.40	1.40
	Weight loss (%)	15.67	17.03	17.37
5 (70:30)	Compressive strength (MPa)	18.55	24.60	28.68
	Water absorption (%)	17.66	16.08	15.13
	Bulk density (g/cm^3)	1.34	1.34	1.35
	Weight loss (%)	18.69	18.78	18.93
6 (80:20)	Compressive strength (MPa)	8.98	15.59	18.57
	Water absorption (%)	18.98	18.85	16.87
	Bulk density (g/cm^3)	1.33	1.34	1.33
	Weight loss (%)	19.97	19.80	20.93

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

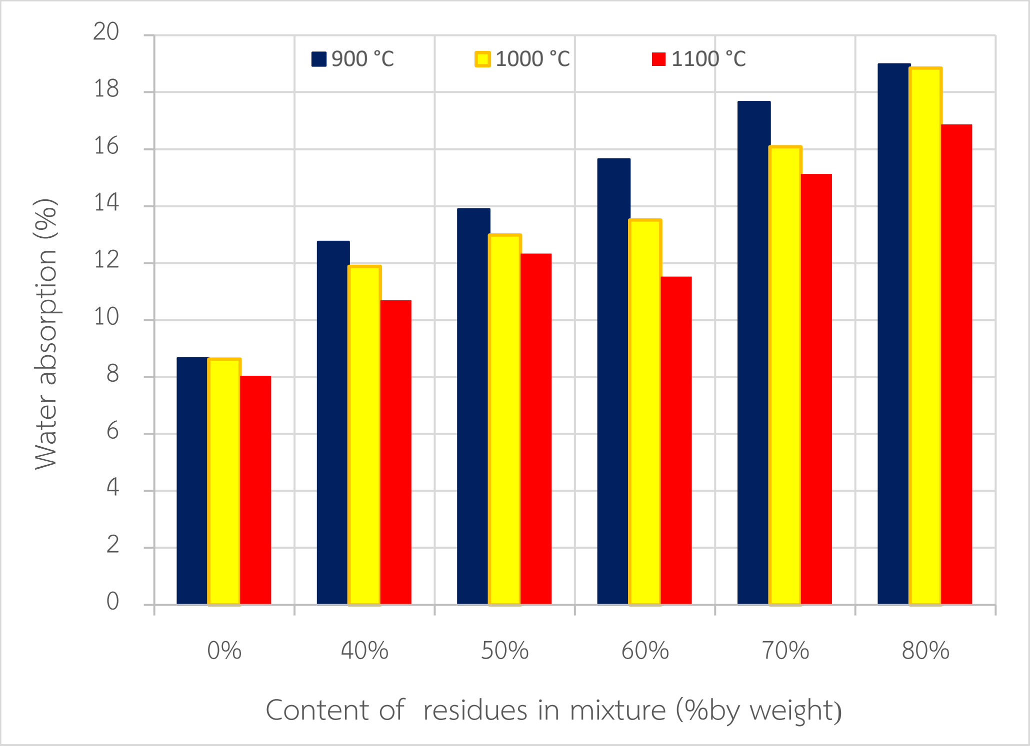
จากตารางผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลพบว่าปริมาณของตะกอนจากเหมืองที่เพิ่มมากขึ้น ค่าของความต้านแรงอัดมีค่ามากขึ้น โดยที่ปริมาณตะกอนที่ 50% และ 60% ของน้ำหนัก มีค่าอยู่ที่ 42.50 และ 43.56 เมกกะพาสคาล ตามลำดับ เมื่อพิจารณาอุณหภูมิของการเผาพบว่าที่อุณหภูมิ 1000 และ 1100 องศาเซลเซียส มีค่าผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลไม่ต่างกัน แต่เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิการเผา 900 องศาเซลเซียส พบว่าค่าทดสอบคุณสมบัติเชิงกลมีค่าต่างกัน เพราะในกระบวนการเผาที่อุณหภูมิสูงที่มากกว่า 850 องศาเซลเซียส มีกระบวนการเกิดการเผาซินเทอร์ (Sintering process) จึงทำให้อนุภาคมีการเชื่อมกันระหว่างอนุภาคส่งผลให้ค่าความต้านแรงอัดสามารถรับค่าได้มาก

ปริมาณของตะกอนจากเหมืองต่อดินเหนียวที่มากกว่า 60% พบว่ามีสารประกอบคาร์บอเนต จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของทางเคมีเกิดเป็นแก๊สและรูพรุนภายในจำนวนมาก ทำให้ความสามารถในการรองรับความต้านแรงอัด มีน้อยลงส่งผลให้ค่าของการทดสอบมีค่าลดลงอย่างชัดเจน ส่วนค่าของการดูดซึมน้ำพบว่าอิฐตะกอนดินเผาที่มีส่วนประกอบของตะกอนมาก จะมีค่าการ

ดูดซึมน้ำที่มากขึ้นตามปริมาณของตะกอนเนื่องจากความพรุนที่เกิดขึ้นมาค่าเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณตะกอน ในทางกลับกันอุณหภูมิเพิ่มมากขึ้น ปริมาณตะกอนคงที่ ค่าการดูดซึมจะมีค่าลดลง เพราะรูพรุนที่เกิดขึ้นในกระบวนการเผามีค่าลดลงตามกระบวนการเกิดการเผาแบบซินเทอร์

เมื่อพิจารณาค่าของความหนาแน่นและค่าสูญเสียน้ำหนัก พบว่ามีความสัมพันธ์ไปทางเดียวกันคือ ปริมาณตะกอนเท่ากัน การเผามีอุณหภูมิเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ค่าความหนาแน่นและค่าสูญเสียน้ำหนักมีค่าเพิ่มมากขึ้น เมื่อถ้าอุณหภูมิคงที่ ปริมาณตะกอนเพิ่มขึ้น ค่าของการสูญเสียน้ำหนักมากขึ้น ส่วนค่าความหนาแน่นมีผลที่ 1.33-1.51 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ทั้งเพราะกระบวนการเผาที่อุณหภูมิสูงมีการเปลี่ยนแปลงสถานทางเคมีเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งจะออกสู่ระบบบรรยากาศทำให้เกิดการลดลงของมวล ส่งผลให้ค่าน้ำหนักของผลิตภัณฑ์มีค่าลดลง

4.5.1 อัตราการดูดซึมน้ำ



รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตะกอนกับอัตราการดูดซึมน้ำ

จากรูปภาพที่ 4.3 จะเห็นว่าที่อุณหภูมิเพิ่มเท่ากัน เปอร์เซ็นต์ของตะกอนเพิ่มมากขึ้น ค่าของค่าการดูดซึมน้ำจะเพิ่มขึ้น เพราะว่าแคลเซียมคาร์บอเนตเมื่อได้รับความร้อนจะเกิดกระบวนการเปลี่ยนเป็นแคลเซียมออกไซด์ และ คาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเกิดขึ้นจะทำให้เกิดรูพรุนที่มากขึ้น ส่งผล

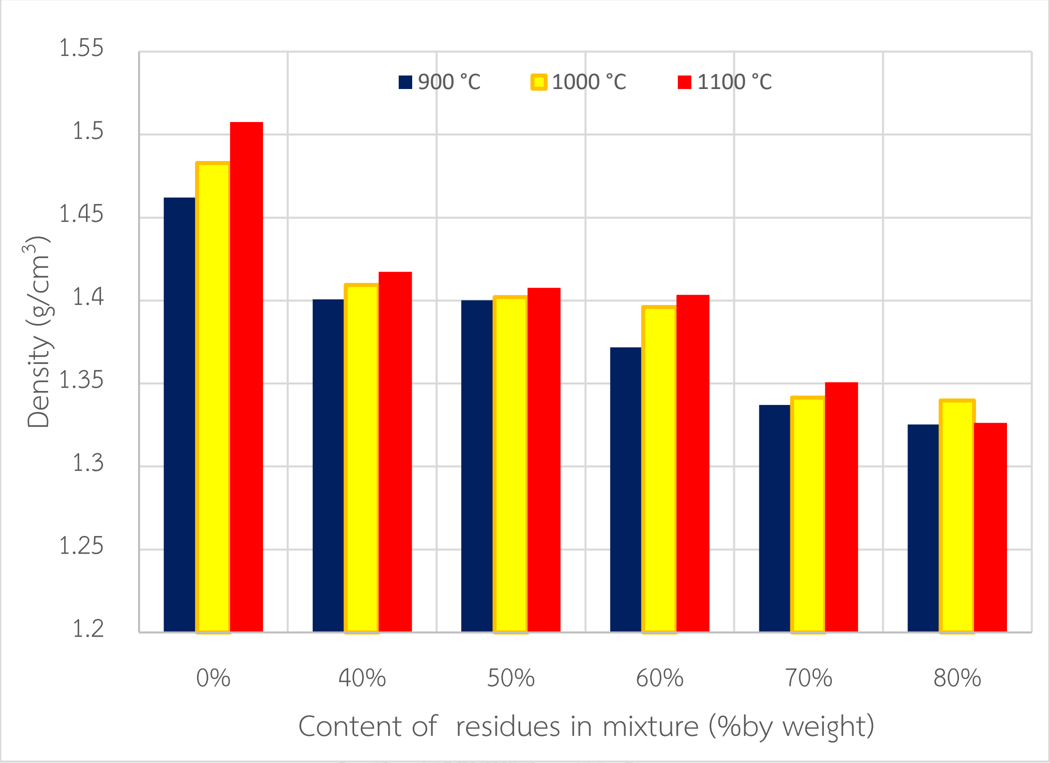
ให้ค่าการดูดซึมน้ำมีค่าเพิ่มมากขึ้นด้วย แต่ในทางกลับกัน ถ้าเปอร์เซ็นต์ตะกอนคงที่และอุณหภูมิมีค่ามากขึ้น จะทำให้ค่าการดูดซึมน้ำลดลง เพราะว่า แคลเซียมคาร์บอเนตเกิดกระบวนการเกิดกระบวนการเผาแบบซินเทอร์ (เกิดที่อุณหภูมิมากกว่า 850 องศาเซลเซียส) ก็จะเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์มากขึ้น ทำให้ปริมาณของแคลซียมออกไซด์มีมากขึ้น ซึ่งเกิดจากแคลเซียมคาร์บอเนต ได้ทำการเชื่อมปิดรูพรุน ส่งผลให้จำนวนรูพรุนลดลง ค่าการดูดซึมน้ำก็จะน้อยลง ดังนั้นค่าของการดูดซึมน้ำต้องพิจารณาจากปริมาณของตะกอนและอุณหภูมิ

$$CaCO_3 \xrightarrow{\text{Heat}} CaO + CO_2$$

ค่าการดูดซึมน้ำมีค่ามากขึ้นตามปริมาณของตะกอนที่เพิ่มมากขึ้น และที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส มีค่าของการดูดซึมน้ำน้อยกว่าการเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เพราะว่าตะกอนจากเหมืองมีปริมาณของคาร์บอเนตอยู่มาก เมื่อได้รับความร้อนจะเปลี่ยนเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งทำให้เกิดรูพรุนมากขึ้นตามปริมาณของคาร์บอเนต เมื่อเทียบกับที่ปริมาณตะกอนที่0เปอร์เซ็นต์ (ที่ไม่มีตะกอนผสม) ซึ่งมีรูพรุนที่เกิดขึ้นน้อย ทำให้ค่าการดูดซึมน้ำมีค่าน้อย โดยค่าของการคำนวณค่าการดูดซึมน้ำแสดงในภาคผนวก ข.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.5.2 ความหนาแน่น



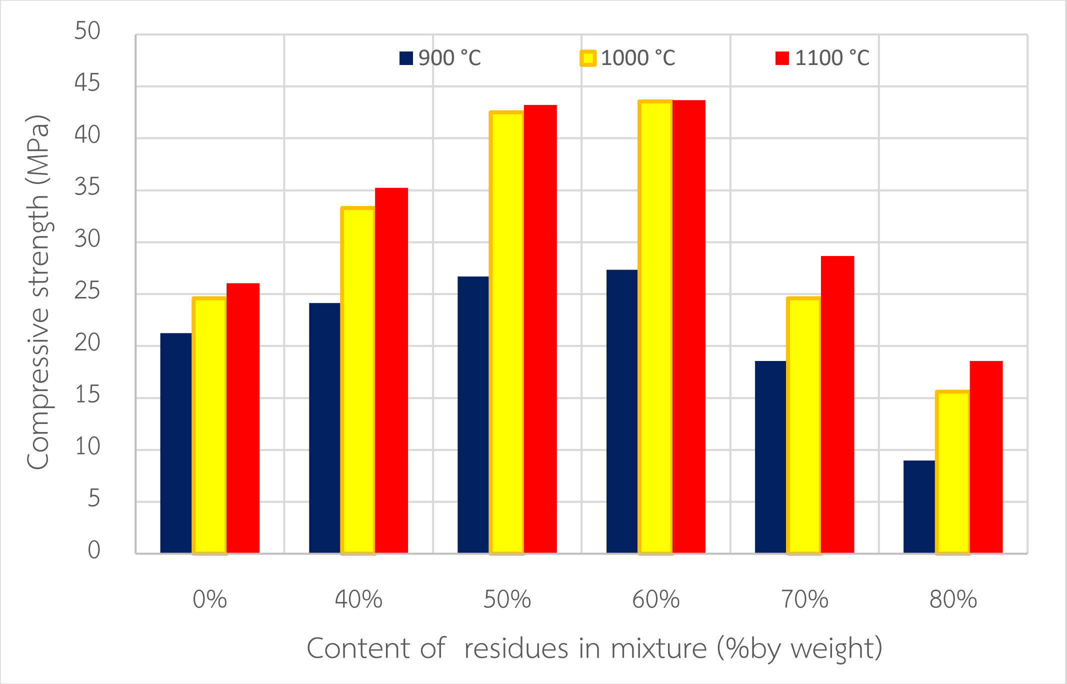
รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของตะกอนกับความหนาแน่น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ในระหว่างการเผาที่อุณหภูมิมากกว่า 850 องศาเซลเซียส จะเกิดกระบวนการเผาแบบซินเทอร์ โดยที่มีการเปิดและปิดรูพรุนที่เกิดขึ้น จากรูปที่ 4.4 เห็นว่าความหนาแน่นมีค่าลดลงตามปริมาณของการผสมดินตะกอนที่มากขึ้น โดยที่ปริมาณตะกอนผสมมากขึ้นค่าความหนาแน่นจะลดลง และเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่ 900, 1000 และ 1100 องศาเซลเซียส ค่าของความหนาแน่นจะมีค่าที่เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิในการเผาที่แตกต่างกัน พบว่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิส่งผลให้อิฐ มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิจะส่งผลให้เกิดเฟส ของเหลวเพิ่มขึ้นและในขณะเดียวกันก็เกิดเฟสของแก้วขึ้นในระหว่างการเผา เนื่องจากซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ที่อยู่ในดินจะเปลี่ยนเป็นเฟสของแก้วที่อุณหภูมิมากกว่า 850 องศาเซลเซียส เชื่อมระหว่างอนุภาคของอิฐ ทำให้มีความหนาแน่นและความต้านแรงอัดมีมากขึ้น โดยชิ้นงานที่มีความหนาแน่นมากที่สุด 1.49 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร แต่เมื่อนำไปเทียบกับการผสมดินตะกอนที่ 0 เปอร์เซ็นต์ จะมีค่าความหนาแน่นน้อยกว่า เนื่องจากที่การผสมดินตะกอน 0 เปอร์เซ็นต์ไม่มีการผสมดินตะกอนจากเหมืองหินซึ่งประกอบด้วยแคลเซียมคาร์บอเนต ส่งผลให้เมื่อนำไปเผาจะไม่เกิดการเปลี่ยนเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ นอกจากนี้เมื่อนำกราฟของความหนาแน่นไปเปรียบเทียบกับกราฟของความต้าน

ของแรงอัดจะมีความสัมพันธ์กันไปในทางเดียวกัน โดยค่าการคำนวณค่าความหนาแน่นแสดงในภาคผนวก ก.

4.5.3 ความต้านแรงอัด



รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตะกอนกับค่าความต้านแรงอัด

ค่าความต้านแรงอัดเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความสามารถการรองรับน้ำหนักหรือรับแรงที่ทนได้ของอิฐ ซึ่งถ้ามีค่ามากทำให้สามารถรองรับค่าน้ำหนักที่กดลงในทิศทางตั้งฉากได้มาก จากรูปที่ 4.5 พบว่าที่ค่าความต้านแรงอัด จะมีค่าลดลงตามปริมาณของการผสมตะกอนจากเหมืองที่มากขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิ พบว่าค่ารับแรงกด ของจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิของการเผา โดยที่อุณหภูมิที่ 1000 และ 1100 องศาเซลเซียส มีค่าที่ไม่ต่างกันมากนักเมื่อเทียบกับ 900 องศาเซลเซียส และเมื่อพิจารณาที่เปอร์เซ็นต์ของตะกอนที่ 60% ที่อุณหภูมิการเผาที่ 1100 องศาเซลเซียส ให้ค่าของความต้านแรงอัดที่สูง โดยมีค่าเป็น 43.67 เมกกะพาสคาล แต่เมื่อเปรียบเทียบกับค่าความต้านแรงอัดของอิฐที่ไม่มีการผสมของตะกอน 0% ที่ 1100 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ 26.05 เมกกะพาสคาล โดยค่าของการคำนวณค่าความต้านแรงอัดแสดงในภาคผนวก ค.

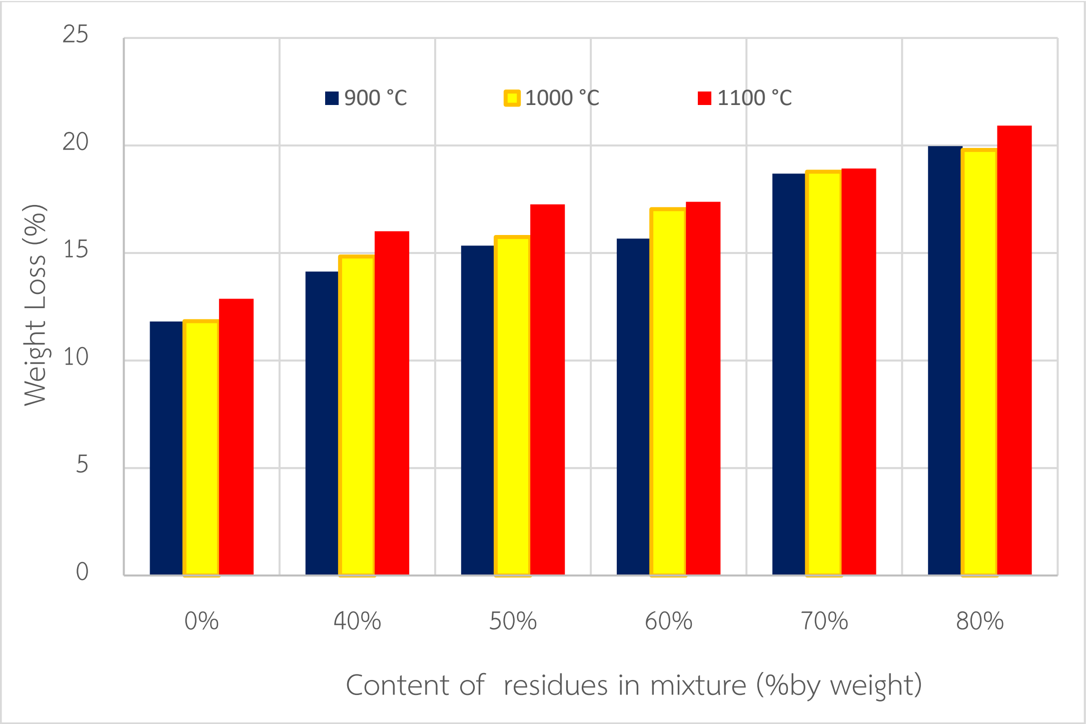
ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าอุณหภูมิการเผาที่สูงกว่า 850 องศาเซลเซียส จะเกิดกระบวนการ Sintering คือกระบวนการที่ของแข็งมีการเปลี่ยนสถานะกลายเป็นสภาวะของเหลวก่อนที่จะเกิด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

กระบวนการหลอมเหลวโดยสภาวะนี้จะทำให้มีการเชื่อมกันหรือประสานกันของอนุภาคของแข็งที่เป็นแกนอยู่ ซึ่งสอดคล้องกับผลของการทดลองที่มีคาร์บอเนตเป็นตัวที่ทำให้เกิดสภาวะการเผาแบบซินเทอร์ โดยจะเห็นได้ว่ายิ่งมีคาร์บอเนตมากก็จะเกิดสภาวะนี้แต่ถ้ามีในปริมาณที่มากเกินไป จะทำให้ค่าความต้านแรงอัดลดลง เพราะว่ากระบวนการเผาแบบซินเทอร์นี้จะเกิดเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วย ก็จะทำให้เกิดรูพรุนด้วยเช่นกันส่งผลให้เกิดความเปราะและรับน้ำหนักได้ไม่มาก แต่เมื่อพิจารณาที่การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ เห็นได้ว่ากระบวนการเผาแบบซินเทอร์จะเกิดที่อุณหภูมิมากกว่า 850 องศาเซลเซียส โดยจากการทดลองจะเห็นได้ชัดเจนที่ 1000 และ 1100 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าความต้านแรงอัดใกล้เคียงกัน แต่ต่างจากที่ 900 องศาเซลเซียส อย่างสิ้นเชิงซึ่งการเพิ่มอุณหภูมิจะส่งผลให้เกิดเฟสของเหลวเพิ่มขึ้นและในขณะเดียวกันก็เกิดเฟสของแก้ว (สภาวะที่ Si ไปจับกับสารตัวอื่นหรือจับกันเองโดยมีตัวอื่นเป็นตัวเชื่อมประสาน) ขึ้นในระหว่างการเผา เนื่องจากซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ที่อยู่ในดินจะเปลี่ยนเป็นเฟสของแก้วที่อุณหภูมิมากกว่า 850 องศาเซลเซียส เชื่อมระหว่างอนุภาคของชิ้นงานทำให้ชิ้นงานมีความหนาแน่นและความต้านแรงอัดมากขึ้น นอกจากนี้กระบวนการเกิดการเผาแบบซินแทอร์ยังได้สนับสนุนในหลักการในส่วนของค่าความต้านแรงอัดให้มีค่ามากขึ้นอีกด้วย (Jan W. Nowok & Kalmanovitch, 1990)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.5.4 การสูญเสียน้ำหนัก



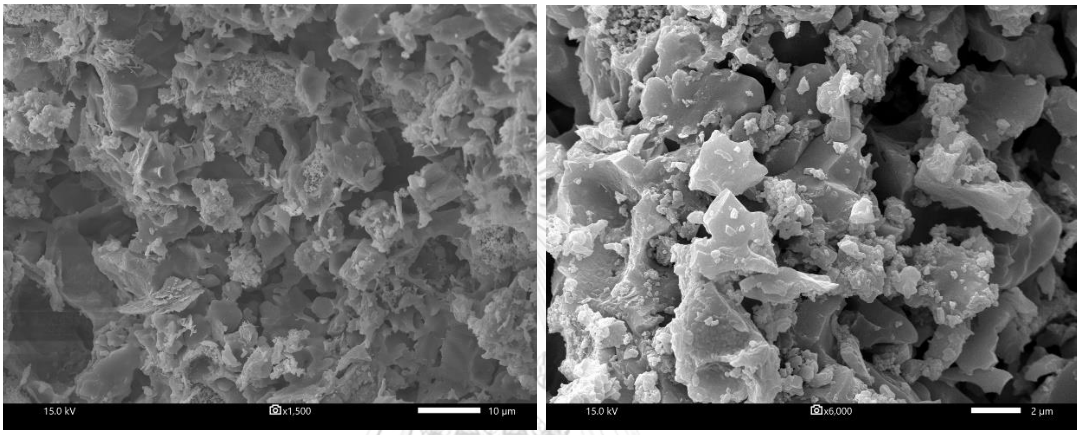
รูปที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตะกอนกับการสูญเสียน้ำหนัก

ตามปกติการให้ความร้อนแก่สารประกอบโดยทั่วไปจะเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและกายภาพหรือเกิดเป็นสารประกอบตัวใหม่เกิดขึ้น หรืออาจมีการเปลี่ยนแปลงอนุภาค รวมไปถึงการเกิดปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นใหม่ได้ ดังนั้นในการให้ความร้อนจำเป็นต้องศึกษาองค์ประกอบของสารประกอบก่อน รวมไปถึงศึกษาปฏิกิริยาข้างเคียงด้วย โดยค่าของการคำนวณค่าความต้านแรงอัดแสดงในภาคผนวก ง.

เมื่ออุณหภูมิสูงมากขึ้นค่าการสูญเสียน้ำหนักจะมีมากขึ้นด้วยเนื่องจากการเผาด้วยอุณหภูมิที่สูงจะทำให้สารอินทรีย์เปลี่ยนเป็นแก๊สชนิดอื่น เช่น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ส่งผลให้น้ำหนักลดลง โดยเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส ค่าการสูญเสียน้ำหนักจะมีค่ามากที่สุด เมื่อพิจารณาของเปอร์เซ็นต์การผสมตะกอนจากเหมืองพบว่าที่ 0% (ไม่มีการผสมตะกอนจากเหมืองมีแต่ดินเหนียวอย่างเดียว มี SiO_2 61.5%, Al_2O_3 18.3%, CaO 0.56%) เมื่อเทียบกับที่ความเข้มข้นต่างกันที่อุณหภูมิเดียวกันของตะกอนที่ผสม พบว่าในดินตะกอนมีปริมาณของสารประกอบคาร์บอเนต 26.5% อยู่ในปริมาณที่มากส่งผลให้เมื่อได้รับความร้อนจะเกิดการเปลี่ยนเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำส่งผลให้เกิดการลดลงของน้ำหนัก นอกจากนี้ในดินตะกอนมีปริมาณของความชื้นจากน้ำสะสมอยู่ เมื่อ

ได้รับความร้อนที่จะส่งผลให้เกิดการระเหยออกไป ทำให้น้ำหนักที่สูญเสียมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย เมื่อเปรียบเทียบที่ความเข้มข้นของดินตะกอนเดียวกันแต่คนละอุณหภูมิ ส่งผลให้การสูญเสียน้ำหนักมีค่ามากขึ้นตามอุณหภูมิของการเผา การเผาที่ 900 องศาเซลเซียสนั้นอาจจะมีสารบางอย่างยังไม่เปลี่ยนแปลง แต่การเผาที่ 1100 องศาเซลเซียสเป็นอุณหภูมิที่สูงกว่ามากทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาณของสารบางชนิดไปอย่างชัดเจน ส่งผลให้ค่าการสูญเสียน้ำหนักมีค่าลดลง

4.5.5 โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



a) low resolution　　　b) advanced resolution

รูปที่ 4.7 ภาพที่เกิดจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ส่องการจัดตัวของอนุภาควัตถุที่จับตัวกัน ซึ่งองค์ประกอบของตะกอนและดินเหนียว จะประกอบด้วย SiO_2, CaO และ Al_2O_3 ซึ่งผลึกของ Quartz หรือ SiO_2 มีลักษณะรูปร่างเป็นผลึกหกเหลี่ยม (hexagonal) เป็นแท่งยาวปลายแหลมทั้งหัวและท้าย และมีขนาดผลึกที่ใหญ่กว่า CaO ส่วน CaO มีรูปร่างที่หลากหลายส่วนใหญ่จะเป็นสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน มีลักษณะเป็นแท่งหัวแหลมและขนาดผลึกจะมีลักษณะขนาดเล็กจับตัวกัน ส่วน Al_2O_3 มีรูปร่างผลึกรูปหกเหลี่ยม (hexagonal) มีลักษณะกลางป่อง ค่อย ๆ เรียวสู่ ปลาย 2 ข้าง ซึ่งคุณสมบัติของสารประกอบแต่ละชนิดจะมีความแตกต่างกันออกไป ซึ่ง SiO_2 มีคุณสมบัติเรื่องความแข็งแรง จุดหลอมเหลวสูง จะช่วยให้อิฐมีความทนต่อการรองรับแรงที่มากระทำ CaO มีจุดหลอมเหลวที่น้อยกว่า SiO_2 ซึ่งจะเป็นตัวเชื่อมประสาน (Sintering) ส่วน Al_2O_3 เมื่อถูกหลอมเหลวจะช่วยเพิ่มความทนไฟ ทนความร้อน เป็นต้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

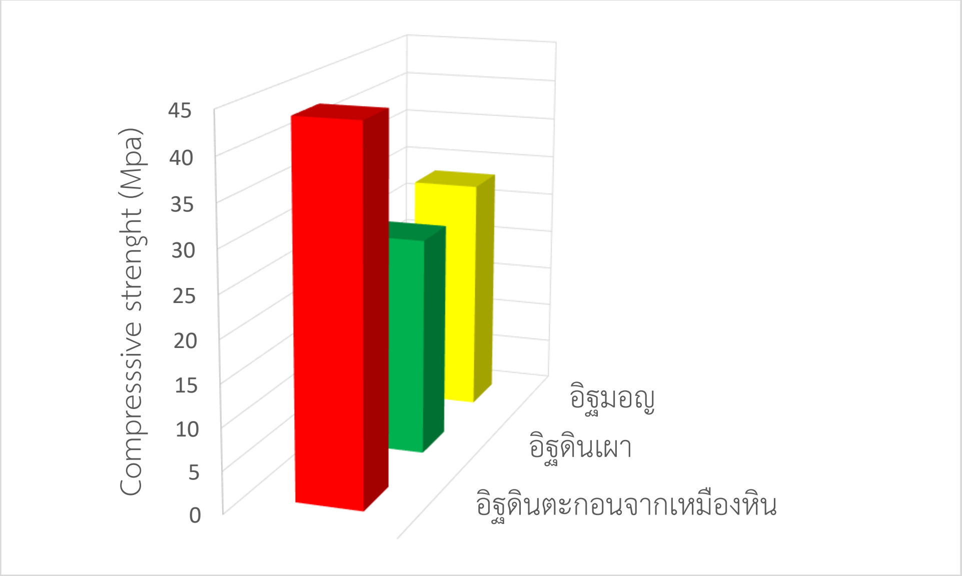
จากรูปที่ 4.7 เป็นการส่องกำลังขยายที่ 1,500 เท่า พบว่าที่พื้นที่ผิวจะมีช่องว่างและการจัดเรียงที่แตกต่างกันไปตามชนิดของผลึก ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความหลากหลายของผลึก โดยช่องว่างที่

เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมี หรือเกิดการสลายตัวไปของแก๊ส ทำให้เกิดลักษณะเป็นรูพรุน แต่เมื่อไปดูที่กำลังขยาย 6,000 เท่า จะเห็นผลึกของซิลิกอนไดออกไซด์ และ แคลเซียมออกไซด์ ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.7 พบว่า แคลเซียมออกไซด์ได้ไปแทรกหรือปิดช่องว่างรูพรุนที่เกิดขึ้นทำให้มีการเรียงตัวของซิลิกอนไดออกไซด์ และแคลเซียมออกไซด์หนาแน่นมากขึ้นและลดรูพรุนที่เกิด นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นการจับตัวกันระหว่างของซิลิกอนไดออกไซด์ และแคลเซียมออกไซด์อีกด้วย

4.6 การเปรียบเทียบคุณสมบัติเชิงกลของอิฐชนิดต่าง ๆ

ในการใช้งานของอิฐพบว่าอิฐมอญมีการใช้งานมากที่สุดเพราะว่ามีราคาไม่สูง และมีคุณสมบัติในการรองรับแรงได้มาก ทำให้เป็นที่แพร่หลายในการใช้งาน ค่าของความต้านแรงอัดอิฐมอญมีกำหนดค่าไว้อย่างต่ำ 35 เมกกะพาสคาล ซึ่งมีค่าสูงกว่าความต้านแรงอัดอิฐดินเผา แต่มีค่าต่ำกว่าอิฐที่ได้จากการผสมดินตะกอน เนื่องจากวัตถุดิบของผลิตภัณฑ์ต่างกันและในการบวนการขึ้นรูปที่ต่างกัน อุณหภูมิที่ต่างกัน ทำให้คุณสมบัติต่างกันอย่างชัดเจน โดยที่อิฐมอฐมีส่วนผสมของแกลบที่ช่วยเพิ่มปริมาณของซิลิกอนไดออกไซด์ แต่ถ้าในปริมาณที่มากไปจะเกิดรูพรุนที่มากและเปราะ ส่วนการขึ้นรูปใช้กระบวนการขึ้นรูปด้วยมือไม่มีควบคุมของแรงกด นอกจากนี้การเผาในระบบเปิดที่อุณหภูมิไม่สูงมากเมื่อเทียบกับการเผาของอิฐที่ได้จากการผสมดินตะกอนที่ใช้ช่วงอุณหภูมิอยู่ที่ 900-1100 องศาเซลเซียส ส่วนอิฐดินเผาเป็นอิฐที่ไม่มีส่วนผสมของตะกอน ประกอบด้วยดินเหนียวเพียงอย่างเดียว แต่ใช้อุณหภูมิช่วงเดียวกับอิฐผสมตะกอน ซึ่งปริมาณของซิลิกอนไดออกไซด์ และอลูมิเนียมออกไซด์ มีน้อยกว่าดินตะกอน จึงทำให้ค่าของความต้านแรงอัดน้อยกว่า ดังนั้นเห็นได้ว่า วัตถุดิบของผลิตภัณฑ์ แรงอัดการขึ้นรูป และอุณหภูมิมีผลต่อค่าของความต้านแรงอัด

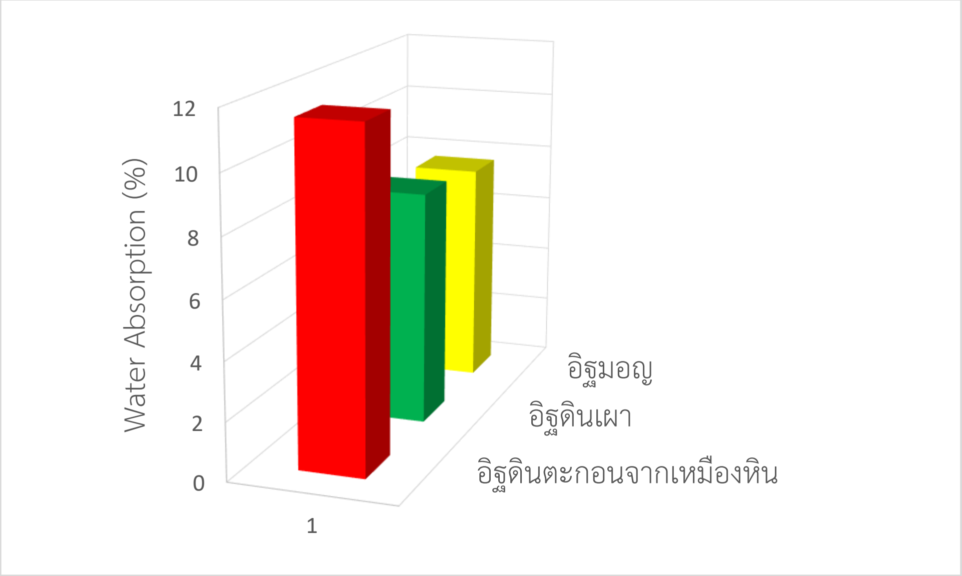
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 4.8 การเปรียบเทียบค่าความต้านแรงอัดระหว่างอิฐชนิดต่าง ๆ

อัตราการดูดซึมน้ำเป็นค่าที่บ่งบอกถึงปริมาณรูพรุนที่เกิดขึ้นภายในอิฐมีผลมาจากปริมาณของสารประกอบแคลเซียมคาร์บอเนตที่อยู่ในตะกอน ซึ่งปริมาณของแคลเซียมคาร์บอเนตในตะกอนมีมากเป็นอันดับที่สอง ดังนั้นในอิฐที่ผสมตะกอนจะมีปริมาณสารประกอบนี้เพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของการผสมตะกอนต่อดินเหนียว โดยที่สารประกอบนี้ได้รับความร้อนจะเปลี่ยนเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และทำให้เกิดรูพรุน ดังนั้นในอิฐดินเผาที่ไม่มีการปนของตะกอนทำให้ปริมาณรูพรุนที่เกิดมีค่าน้อยที่สุด ถัดมาเป็นอิฐมอญที่ไม่มีการผสมของตะกอนจากเหมืองจึงมีรูพรุนที่ไม่มากแต่เนื่องจากวัตถุดิบของอิฐมอญมีแกลบเป็นส่วนประกอบจึงทำให้เกิดรูพรุนมากขึ้น แต่เมื่อพิจารณาของอิฐที่เกิดจากการผสมดินตะกอนกับดินเหนียวทำให้มีสัดส่วนของตะกอนมากกว่าดินเหนียวส่งผลให้มีรูพรุนที่มากกว่าอิฐมอญ ซึ่งแสดงให้เห็นในรูปที่ 4.8 มีค่าความต้านแรงอัดที่มากกว่า

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 4.9 อัตราการดูดซึมน้ำระหว่างอิฐดินตะกอนจากเหมือง อิฐดินเผา และอิฐมอญ

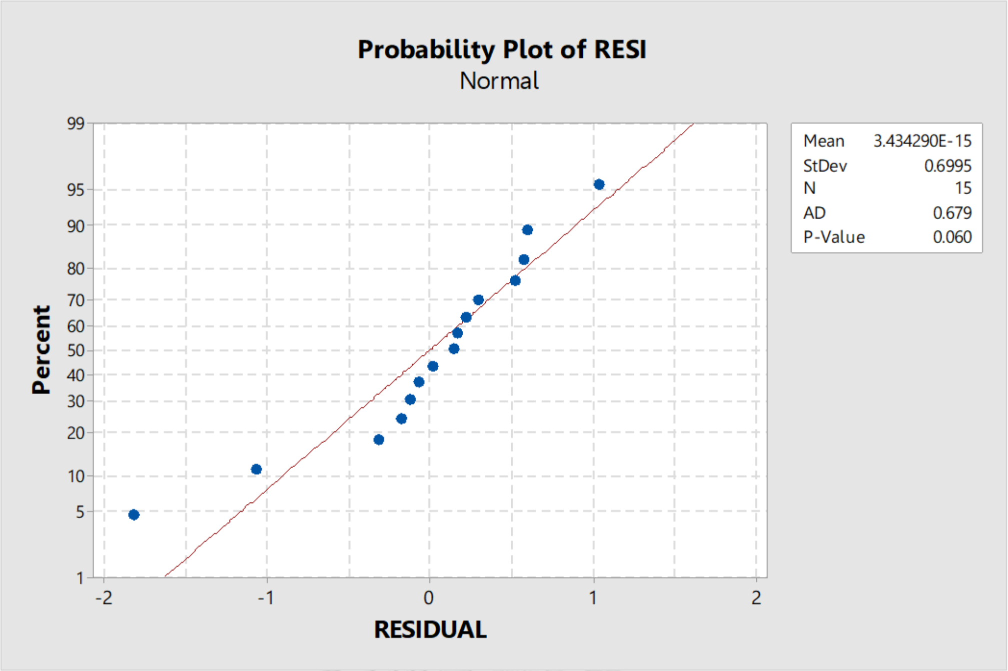
4.7 ผลการวิเคราะห์ปัจจัยที่เกี่ยวข้อง

หลังจากทำการทดลองตามการทดลองแล้ว จะนำผลที่จากการทดลองมาตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลถึงความเหมาะสมของข้อมูลหรือไม่ แล้วทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนว่าปัจจัยใดมีอิทธิพลต่อคุณสมบัติต่าง ๆ ของอิฐดินตะกอนจากเหมืองหิน นอกจากนี้ยังนำผลที่ได้ไปทำการสร้างสมการถดถอยเพื่อดูความสัมพันธ์ของปัจจัยเกี่ยวข้อง

4.7.1 การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบค่าการดูดซึมน้ำ (Water Absorption)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

นำผลการทดลองมาตรวจสอบความเหมาะสม และความถูกต้องด้วยการตรวจสอบการกระจายตัวแบบแจกแจงปกติของการทดสอบการดูดซึมน้ำด้วยกราฟความน่าจะเป็นแบบปกติ (Normal Probability Plot) ซึ่งได้ผลจากโปรแกรมสำเร็จรูป Minitab18 ดังรูปที่ 4.10 พบว่าข้อมูลมีการกระจายมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง สรุปได้ว่าข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ



รูปที่ 4.10 การกระจายของข้อมูลการทดลองการดูดซึมน้ำ

4.7.1.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวน

นำค่าการดูดซึมน้ำที่ได้มาวิเคราะห์ความแปรปรวน ได้ผลดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของผลการทดสอบค่าการดูดซึมน้ำ

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Percent	4	82.303	20.5757	64.64	0.000
Temperature	2	15.342	7.6709	24.10	0.000
Error	8	2.547	0.3183		
Total	14	100.191			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.564210	97.46%	95.55%	91.06%

จากตารางที่ 4.4 สามารถสรุปผลการทดลองที่ระดับนัยสำคัญ α= 0.05 ได้ดังนี้

1. จากการทดสอบสมมติฐานของปัจจัยหลัก

1.1 การทดสอบสมมติฐานของเปอร์เซ็นต์การผสมของตะกอนจากเหมือง

H_0: τ_i=0

H_1: อย่างน้อยหนึ่งตัวที่ $\tau_i \neq 0$

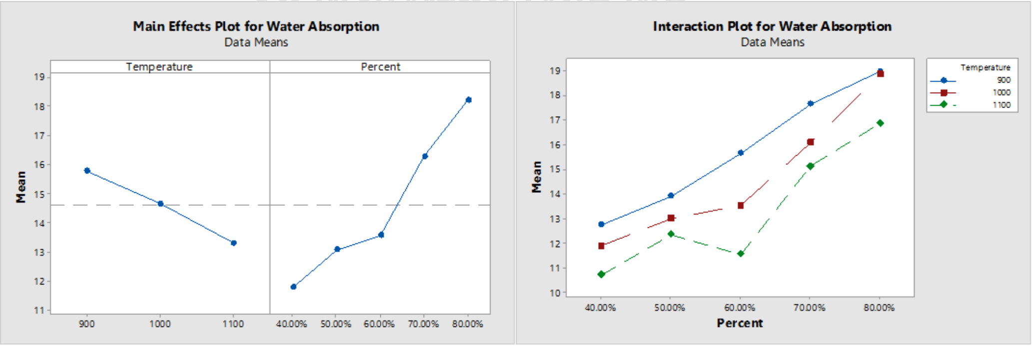
จากตารางที่ 4.4 จะเห็นได้ว่า ค่า P-value < 0.05 จึงปฏิเสธสมมติฐานหลัก H_0 และยอมรับสมมติฐานรอง H_1 ซึ่งหมายความว่า เปอร์เซ็นต์การผสมของตะกอนจากเหมือง มีอิทธิพลต่อค่าการดูดซึมน้ำ (Water Absorption) ระดับนัยสำคัญ α= 0.05

1.2 การทดสอบสมมติฐานของอุณหภูมิที่ใช้เผาอิฐ

H_0: τ_i=0

H_1: อย่างน้อยหนึ่งตัวที่ $\tau_i \neq 0$

จากตารางที่ 4.4 จะเห็นได้ว่า ค่า P-value < 0.05 จึงปฏิเสธสมมติฐานหลัก H_0 และยอมรับสมมติฐานรอง H_1 ซึ่งหมายความว่า อุณหภูมิที่ใช้เผาอิฐ มีอิทธิพลต่อค่าการดูดซึมน้ำ (Water Absorption) ระดับนัยสำคัญ α= 0.05



รูปที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของตะกอนกับอุณหภูมิการเผา

จากกราฟอันตรกิริยา (Interaction plot) ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของตะกอนกับอุณหภูมิการเผา มีลักษณะกราฟที่เกิดขึ้นนั้นขนานกัน ซึ่งวิเคราะห์ได้ว่าอันตกิริยาของปัจจัยทั้งสอง

ไม่มีผลอย่างนัยสำคัญ นอกจากนี้ยังพบว่าการเผาที่อุณหภูมิสูงจะให้ค่าการการดูดซึมน้ำที่ต่ำกว่าการเผาที่อุณหภูมิสูง

หลังจากที่ทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนของแต่ละปัจจัยแล้ว จะทำการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์ของสมการถดถอยได้ดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ค่าสัมประสิทธิ์สมการถดถอยของค่าการดูดซึมน้ำ

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	17.28	2.54	6.81	0.000	
Percent	16.13	1.38	11.69	0.000	1.00
Temperature	-0.01237	0.00239	-5.18	0.000	1.00

จากการวิเคราะห์การถดถอยพบว่า ปัจจัยหลัก 2 ปัจจัยคือ เปอร์เซ็นต์ของตะกอนจากเหมืองกับ อุณหภูมิที่ใช้ในการเผามีผลต่อค่าการดูดซึมน้ำ (Water Absorption)ที่ระดับนัยสำคัญ α= 0.05 เนื่องจากพบว่า ค่า P-value มีค่าน้อยกว่า 0.05 และสามารถเขียนสมการถดถอยของค่าการดูดซึมน้ำได้ดังนี้

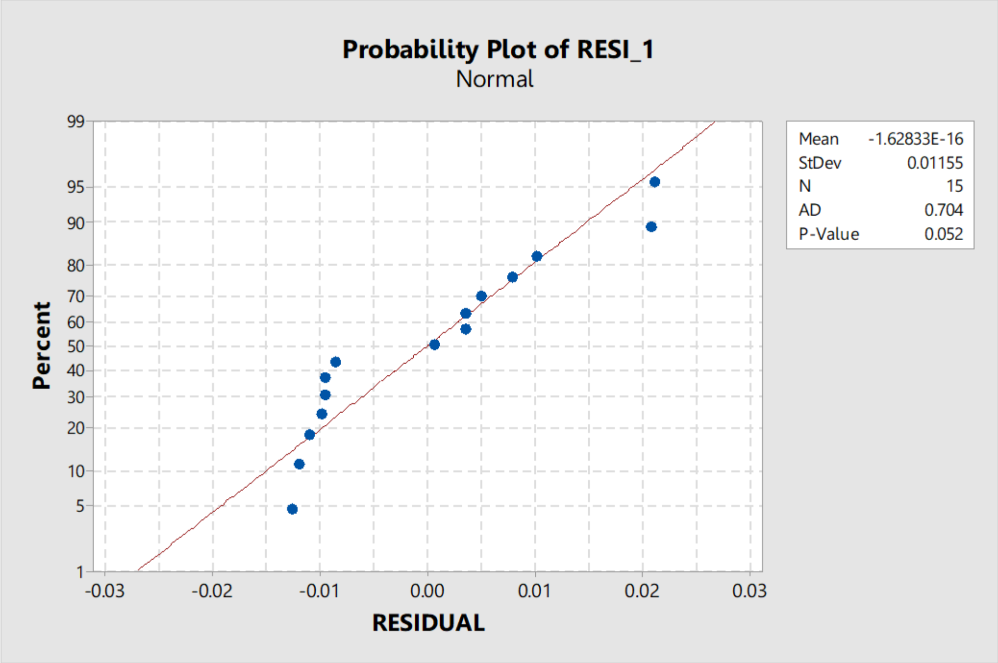
Regression Equation

Water Absorption = 17.28 + 16.13 Percent - 0.01237 Temperature

Chulalongkorn University

4.7.2 การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบค่าความหนาแน่น

นำผลการทดลองมาตรวจสอบความเหมาะสม และความถูกต้องด้วยการตรวจสอบการกระจายตัวแบบแจกแจงปกติของการทดสอบหาค่าความหนาแน่น (Density) ด้วยกราฟความน่าจะเป็นแบบปกติ (Normal Probability Plot) ซึ่งได้ผลจากโปรแกรมสำเร็จรูป Minitab18 ดังรูปที่ 4.12 พบว่ากราฟมีการกระจายมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง สรุปได้ว่าข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงการกระจายของข้อมูลการทดลองค่าความหนาแน่น

4.7.2.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวน

นำค่าผลการทดสอบค่าความหนาแน่นที่ได้มาวิเคราะห์ความแปรปรวน ได้ผลดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของผลการทดสอบค่าความหนาแน่น

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Percent	4	0.015616	0.003904	77.79	0.000
Temperature	2	0.000542	0.000271	5.40	0.033
Error	8	0.000401	0.000050		
Total	14	0.016560			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.0070842	97.58%	95.76%	91.48%

จากตารางที่ 4.6 สามารถสรุปผลการทดลองที่ระดับนัยสำคัญ α= 0.05 ได้ดังนี้

1. การทดสอบสมมติฐานของปัจจัยหลัก

1.1 การทดสอบสมมติฐานของเปอร์เซ็นต์การผสมของตะกอนจากเหมือง

H_0: τ_i=0

H_1: อย่างน้อยหนึ่งตัวที่ $\tau_i \neq 0$

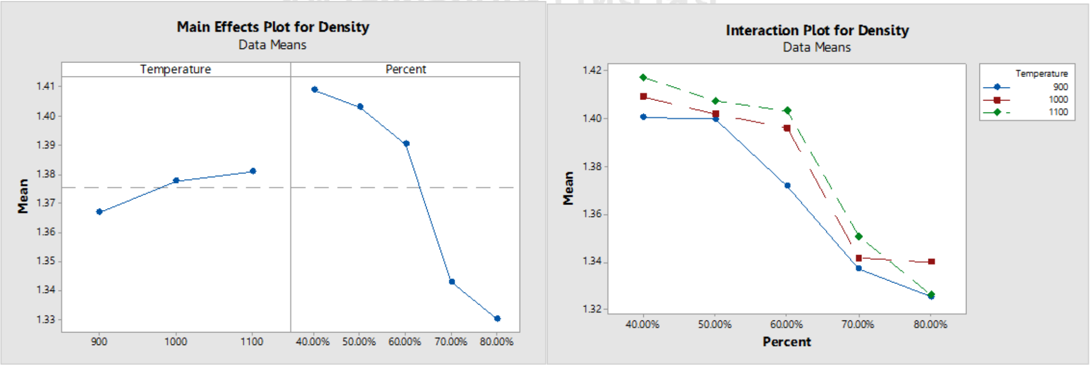
จากตารางที่ 4.6 จะเห็นได้ว่า ค่า P-value < 0.05 จึงปฏิเสธสมมติฐานหลัก H_0 และยอมรับสมมติฐานรอง H_1 ซึ่งหมายความว่า เปอร์เซ็นต์การผสมของตะกอนจากเหมือง มีอิทธิพลต่อค่าความหนาแน่น (Density) ระดับนัยสำคัญ α= 0.05

1.2 การทดสอบสมมติฐานของอุณหภูมิที่ใช้เผาอิฐ

H_0: τ_i=0

H_1: อย่างน้อยหนึ่งตัวที่ $\tau_i \neq 0$

จากตารางที่ 4.6 จะเห็นได้ว่า ค่า P-value < 0.05 จึงปฏิเสธสมมติฐานหลัก H_0 และยอมรับสมมติฐานรอง H_1 ซึ่งหมายความว่า อุณหภูมิที่ใช้เผาอิฐ มีอิทธิพลต่อค่าความหนาแน่น (Density) ระดับนัยสำคัญ α= 0.05



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของตะกอนกับอุณหภูมิการเผา

จากกราฟอันตรกิริยา (Interaction plot) ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของตะกอนกับอุณหภูมิการเผา มีลักษณะกราฟที่เกิดขึ้นนั้นขนานกัน ซึ่งวิเคราะห์ได้ว่าอันตกิริยาของปัจจัยทั้งสองไม่มีผลอย่างนัยสำคัญ

หลังจากที่ทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนของแต่ละปัจจัยแล้ว จะทำการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์ของสมการถดถอยได้ดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ค่าสัมประสิทธิ์สมการถดถอยของค่าความหนาแน่น

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	1.4354	0.0419	34.28	0.000	
Percent	-0.2175	0.0228	-9.55	0.000	1.00
Temperature	0.000070	0.000039	1.79	0.099	1.00

จากการวิเคราะห์การถดถอยพบว่า ปัจจัยหลัก 2 ปัจจัยคือ เปอร์เซ็นต์ของตะกอนจากเหมืองกับ อุณหภูมิที่ใช้ในการเผามีผลต่อค่าความหนาแน่น (Density) ที่ระดับนัยสำคัญ α= 0.05 เนื่องจากพบว่า ค่า P-value มีค่าต่ำกว่า 0.05 และสามารถเขียนสมการถดถอยของค่าการดูดซึมน้ำได้ดังนี้

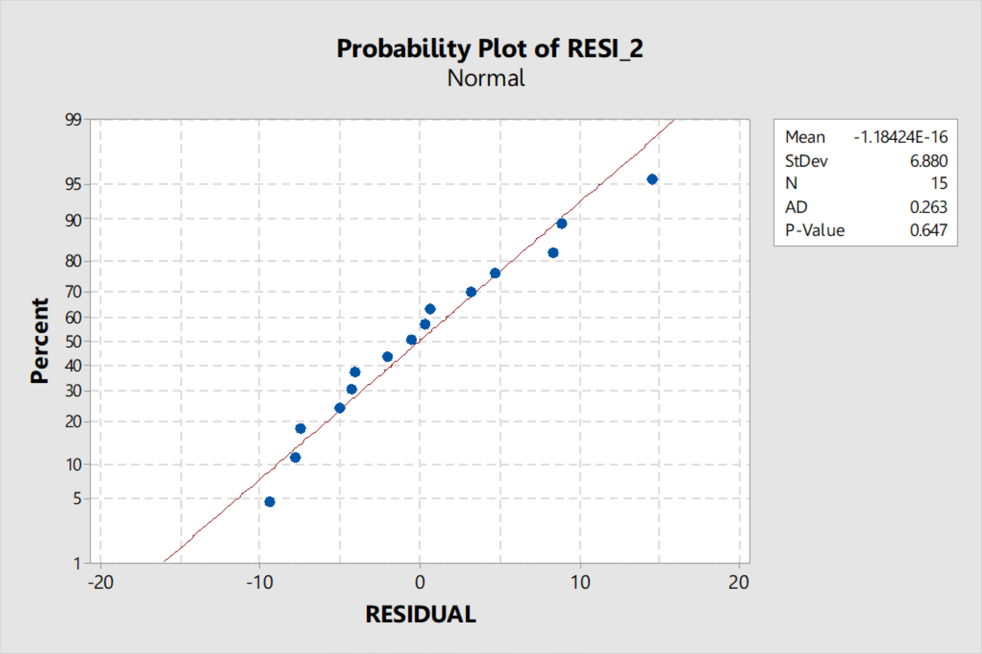
Regression Equation

Density = 1.4354 - 0.2175 Percent + 0.000070 Temperature

4.7.3 การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบค่าความต้านแรงอัด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

นำผลการทดลองมาตรวจสอบความเหมาะสม และความถูกต้องด้วยการตรวจสอบการกระจายตัวแบบแจกแจงปกติของการทดสอบค่าความต้านแรงอัด (Compressive strength) ด้วยกราฟความน่าจะเป็นแบบปกติ (Normal Probability Plot) ซึ่งได้ผลจากโปรแกรมสำเร็จรูป Minitab18 ดังรูปที่ 4.14 พบว่าข้อมูลมีการกระจายมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง สรุปได้ว่าข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงการกระจายของข้อมูลการทดลองค่าการทดสอบความต้านแรงอัด

4.7.3.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวน

นำค่าการทดสอบแรงกดที่ได้มาวิเคราะห์ความแปรปรวน ได้ผลดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าการทดสอบความต้านแรงอัด

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	2	1055.6	527.80	9.56	0.003
Percent	1	650.3	650.30	11.77	0.005
Temperature	1	405.3	405.30	7.34	0.019
Error	12	662.8	55.23		
Total	14	1718.4			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
7.43177	61.43%	55.00%	40.81%

จากตารางที่ 4.8 สามารถสรุปผลการทดลองที่ระดับนัยสำคัญ α= 0.05 ได้ดังนี้

1. การทดสอบสมมติฐานของปัจจัยหลัก

1.1 การทดสอบสมมติฐานของเปอร์เซ็นต์การผสมของตะกอนจากเหมือง

H_0: τ_i=0

H_1: อย่างน้อยหนึ่งตัวที่ $\tau_i \neq 0$

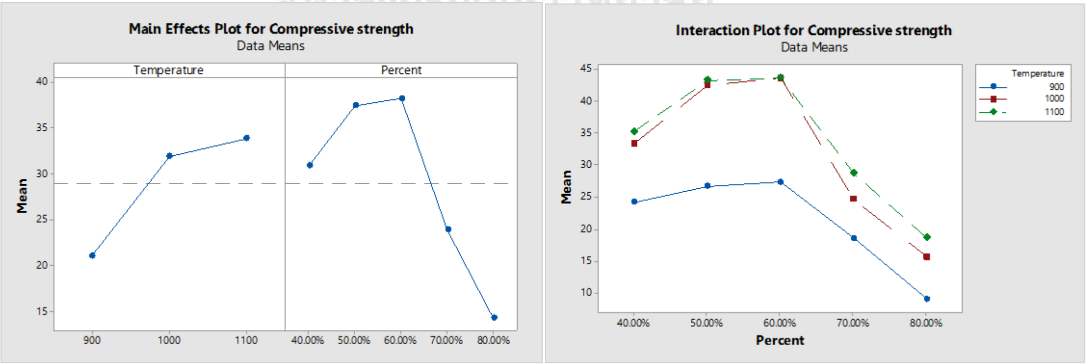
จากตารางที่ 4.8 จะเห็นได้ว่า ค่า P-value $<$ 0.05 จึงปฏิเสธสมมติฐานหลัก H_0 และยอมรับสมมติฐานรอง H_1 ซึ่งหมายความว่า เปอร์เซ็นต์การผสมของตะกอนจากเหมือง มีอิทธิพลต่อค่าความต้านแรงอัด (Compressive strength) ระดับนัยสำคัญ α= 0.05

1.2 การทดสอบสมมติฐานของอุณหภูมิที่ใช้เผาอิฐ

H_0: τ_i=0

H_1: อย่างน้อยหนึ่งตัวที่ $\tau_i \neq 0$

จากตารางที่ 4.8 จะเห็นได้ว่า ค่า P-value $<$ 0.05 จึงปฏิเสธสมมติฐานหลัก H_0 และยอมรับสมมติฐานรอง H_1 ซึ่งหมายความว่า อุณหภูมิที่ใช้เผาอิฐ มีอิทธิพลต่อค่าความต้านแรงอัด (Compressive strength) ระดับนัยสำคัญ α= 0.05



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของตะกอนกับอุณหภูมิการเผา

จากกราฟอันตรกิริยา (Interaction plot) ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของตะกอนกับอุณหภูมิการเผา มีลักษณะกราฟที่เกิดขึ้นนั้นขนานกัน ซึ่งวิเคราะห์ได้ว่าอันตกิริยาของปัจจัยทั้งสองไม่มีผลอย่างนัยสำคัญ

หลังจากที่ทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนของแต่ละปัจจัยแล้ว จะทำการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์ของสมการถดถอยได้ดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 สัมประสิทธิ์ของสมการถดถอยค่าการทดสอบความต้านแรงอัด

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	-6.8	24.9	-0.27	0.791	
Percent	-46.6	13.6	-3.43	0.005	1.00
Temperature	0.0637	0.0235	2.71	0.019	1.00

จากการวิเคราะห์การถดถอยพบว่า ปัจจัยหลัก 2 ปัจจัยคือ เปอร์เซ็นต์ของตะกอนจากเหมืองกับ อุณหภูมิที่ใช้ในการเผามีผลต่อค่าการทดสอบความต้านแรงอัด (Compressive strength) ที่ระดับนัยสำคัญ α= 0.05 เนื่องจากพบว่า ค่า P-value มีค่าต่ำกว่า 0.05 และสามารถเขียนสมการถดถอยของค่าการดูดซึมน้ำได้ดังนี้

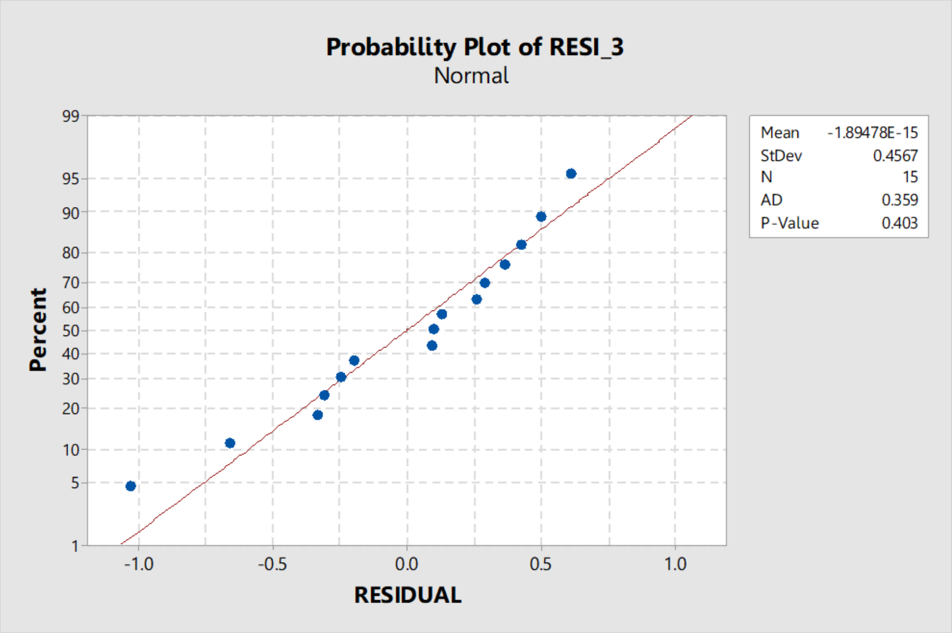
Regression Equation

Compressive strength = -6.8 - 46.6 Percent + 0.0637 Temperature

4.7.4 การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบค่าการสูญเสียน้ำหนัก (Weight Loss)

นำผลการทดลองมาตรวจสอบความเหมาะสม และความถูกต้องด้วยการตรวจสอบการกระจายตัวแบบแจกแจงปกติของการทดสอบหาค่าการสูญเสียน้ำหนัก (Weight Loss) ด้วยกราฟความน่าจะเป็นแบบปกติ (Normal Probability Plot) ซึ่งได้ผลจากโปรแกรมสำเร็จรูป Minitab18 ดังรูปที่ 4.16 พบว่าข้อมูลมีการกระจายมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง สรุปได้ว่าข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 4.16 กราฟการกระจายของข้อมูลการทดลองค่าการสูญเสียน้ำหนัก

4.7.4.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวน

นำค่าการสูญเสียน้ำหนักที่ได้มาวิเคราะห์ความแปรปรวน ได้ผลดังตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของผลการทดสอบค่าการสูญเสียน้ำหนัก

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	3	57.0097	19.0032	71.59	0.000
Percent	1	1.8735	1.8735	7.06	0.022
Temperature	1	1.5626	1.5626	5.89	0.034
Percent*Temperature	1	0.6163	0.6163	2.32	0.156
Error	11	2.9200	0.2655		
Total	14	59.9297			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.515219	95.13%	93.80%	89.79%

จากตารางที่ 4.10 สามารถสรุปผลการทดลองที่ระดับนัยสำคัญ α= 0.05 ได้ดังนี้

1. การทดสอบสมมติฐานของปัจจัยหลัก

1.1 การทดสอบสมมติฐานของเปอร์เซ็นต์การผสมของตะกอนจากเหมือง

H_0: τ_i=0

H_1: อย่างน้อยหนึ่งตัวที่ $\tau_i \neq 0$

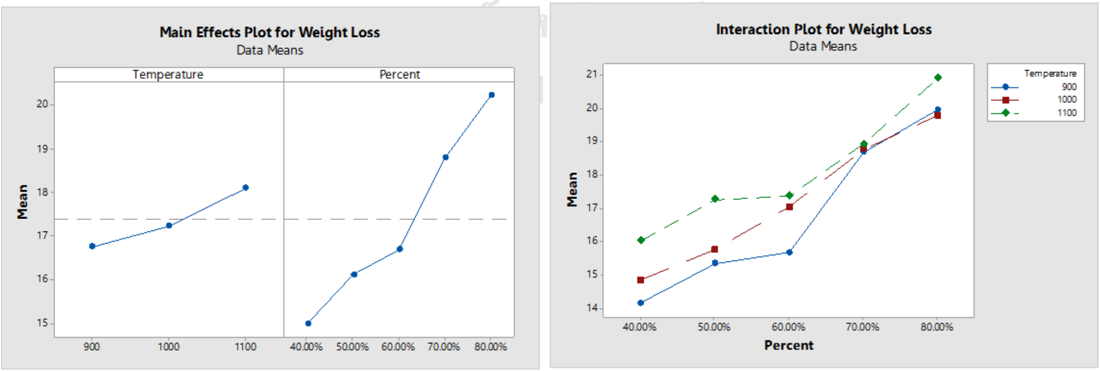
จากตารางที่ 4.10 จะเห็นได้ว่า ค่า P-value < 0.05 จึงปฏิเสธสมมติฐานหลัก H_0 และยอมรับสมมติฐานรอง H_1 ซึ่งหมายความว่า เปอร์เซ็นต์การผสมของตะกอนจากเหมือง มีอิทธิพลต่อค่าการสูญเสียน้ำหนัก (Weight Loss) ระดับนัยสำคัญ α= 0.05

1.2 การทดสอบสมมติฐานของอุณหภูมิที่ใช้เผาอิฐ

H_0: τ_i=0

H_1: อย่างน้อยหนึ่งตัวที่ $\tau_i \neq 0$

จากตารางที่ 4.10 จะเห็นได้ว่า ค่า P-value < 0.05 จึงปฏิเสธสมมติฐานหลัก H_0 และยอมรับสมมติฐานรอง H_1 ซึ่งหมายความว่า อุณหภูมิที่ใช้เผาอิฐ มีอิทธิพลต่อค่าการสูญเสียน้ำหนัก (Weight Loss) ระดับนัยสำคัญ α= 0.05



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของตะกอนกับอุณหภูมิการเผา

จากกราฟอันตรกิริยา (Interaction plot) ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของตะกอนกับอุณหภูมิการเผา มีลักษณะกราฟที่เกิดขึ้นนั้นขนานกัน ซึ่งวิเคราะห์ได้ว่าอันตกิริยาของปัจจัยทั้งสองไม่มีผลอย่างนัยสำคัญ

หลังจากที่ทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนของแต่ละปัจจัยแล้ว จะทำการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์ของสมการถดถอยได้ดังตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 สัมประสิทธิ์ค่าการสูญเสียน้ำหนัก

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	-7.76	7.13	-1.09	0.300	
Percent	30.7	11.6	2.66	0.022	151.00
Temperature	0.01723	0.00710	2.43	0.034	19.00
Percent*Temperature	-0.0176	0.0115	-1.52	0.156	169.00

จากการวิเคราะห์การถดถอยพบว่า ปัจจัยหลัก 2 ปัจจัยคือ เปอร์เซ็นต์ของตะกอนจากเหมืองกับ อุณหภูมิที่ใช้ในการเผามีผลต่อค่าการสูญเสียน้ำหนัก (Weight Loss) ที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ เนื่องจากพบว่า ค่า P-value มีค่าต่ำกว่า 0.05 และสามารถเขียนสมการถดถอยของค่าการดูดซึมน้ำได้ดังนี้

Regression Equation

Weight Loss = -7.76 + 30.7 Percent + 0.01723 Temperature - 0.0176 Percent*Temperature

CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.8 การวิเคราะห์ทางวิศวกรรมคุณค่า

การวิเคราะห์ทางวิศวกรรมคุณค่าแสดงให้เห็นถึงการนำตะกอนจากเหมืองมาเพิ่มมูลค่าให้เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่ามากกว่าเดิม ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับราคาของต้นทุนในการผลิต และราคาของวัตถุดิบ ดังแสดงในตาราง 4.12

ตารางที่ 4.12 แสดงข้อมูลที่ใช้ในขั้นตอนกระบวนการผลิตอิฐ

รายการ	ราคาต่อหน่วย		จำนวนหน่วย	
กำหนดการผลิต	360,000	ก้อน	180	ตัน
ระยะเวลา	30	วัน		
น้ำหนักอิฐ	0.50	กก./ก้อน		
ราคาขาย	1.20	บาท/ก้อน	360,000	ก้อน
ดินเหนียวราคา	500	บาท/ตัน		
ค่าขนส่งรถบรรทุก6ล้อ	11,000	บาท/เที่ยว		
ไฟฟ้า	3	บาท/หน่วย	620	หน่วย
ค่าแรงงานขนส่ง ลำเลียง	400	บาท/วัน	3	คน
ค่าจ้างขึ้นรูป	1,500	บาท/วัน	2	คน
ค่าจ้างเผา	1,000	บาท/ครั้ง	2	คน
ค่าเครื่องจักรขึ้นรูป	20,000	บาท/เดือน	1	เดือน

ในกระบวนการผลิตอิฐดินเผาสามารถนำดินตะกอนจากเหมืองมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตอิฐได้ ซึ่งจะให้คุณสมบัติตามตารางผลการทดลอง ซึ่งกระบวนการผลิตอิฐดินเผาสามารถจำแนกต้นทุนที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตได้ตามตารางที่ 4.12 ซึ่งมีทั้งเครื่องจักร แรงงาน และวัตถุดิบ ที่ได้จากการทำเหมืองจากจังหวัดชุมพร นอกจากนี้ในการคำนวณกำหนดให้ใช้ดินเหนียวจากจังหวัดในอยุธยา ซึ่งจะมีค่าขนส่งจากจังหวัดอยุธยาไปจังหวัดชุมพร เพื่อง่ายต่อการคำนวณได้กำหนดปริมาณของกระบวนการผลิตไว้ที่ 30 วัน จำนวนที่ผลิตอิฐ 360,000 ก้อน โดยน้ำหนักต่อก้อนอยู่ที่ 0.5 กิโลกรัม และค่าเครื่องจักรได้กำหนดไว้ในตารางด้วย ด้วยกระบวนผลิตที่แต่ละที่ไม่ต่างกันมาก ทำให้สามารถสร้างโรงงานหรือแหล่งผลิตได้หลากหลายที่ ซึ่งปัจจัยที่เกี่ยวข้องของการตั้งโรงงานการผลิตคือ ต้องมีวัตถุดิบป้อนให้กับโรงงาน และเพียงพอต่อการผลิต การขนส่ง และความต้องการของลูกค้าในตำแหน่งภูมิภาคนั้น ดังนั้นการเปรียบเทียบที่ตั้งของโรงงานจึงเป็นเหตุอย่างหนึ่งในการลดต้นทุน ซึ่งแจกแจงได้ดังต่อไปนี้

1. ข้อดีของการตั้งโรงงานที่มีวัตถุดิบ (เหมืองหิน) ถือเป็นการลดต้นทุนด้านการขนส่ง เพราะว่าในขั้นตอนการผลิตหิน จะมีตะกอนที่ได้จากเหมือง ทำให้ไม่จำเป็นต้องขนส่งวัตถุดิบไปอีกสถานที่หนึ่ง นอกจากนี้ในทางภาคใต้มีแหล่งผลิตอิฐดินเผาที่น้อยมาก ทำให้ได้เปรียบต้นทุนด้านการขนส่งผลิตภัณฑ์จากภูมิภาคอื่นมายังภาคใต้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

2. ข้อเสียของการตั้งโรงงานที่อยู่ในเหมืองหิน พบว่าตะกอนที่ได้จากเหมืองหิน ไม่สามารถนำมาสร้างเป็นผลิตภัณฑ์อิฐดินเผาได้ทันที โดยจำเป็นต้องนำตะกอนไปเป็นวัตถุดิบผสมกับดินเหนียว ซึ่งด้วยลักษณะทางภูมิภาคของภาคใต้ไม่มีดินเหนียว ทำให้ต้องขนส่งจากที่อื่นมายังภาคใต้ ส่งผลให้ต้นทุนด้านขนส่งดินเหนียวเพิ่มขึ้น

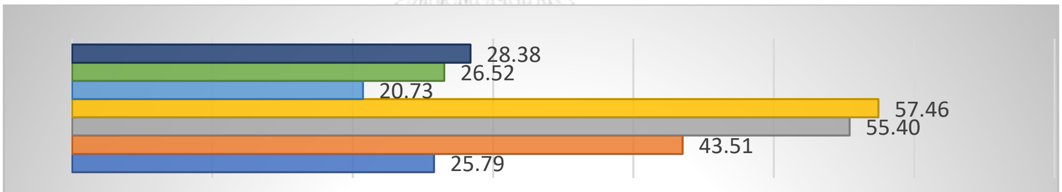
ตารางที่ 4.13 การวิเคราะห์ต้นทุนที่เกี่ยวข้องของผลิตอิฐดินเผาที่สัดส่วนการผสมต่าง ๆกัน

ต้นทุนแปรผัน			**เปอร์เซ็นต์ของวัตถุดิบ**			
ตะกอนจากเหมือง	0%	40%	50%	60%	70%	80%
วัตถุดิบดินเหนียว	100.00	60.00	50.00	40.00	30.00	20.00
จำนวนดินตะกอนจากเหมือง (ตัน)	-	72.00	90.00	108.00	126.00	144.00
จำนวนดินเหนียว (ตัน)	180.00	108.00	90.00	72.00	54.00	36.00
ราคารวมวัตถุดิบ (บาท)	90,000	54,000	45,000	36,000	27,000	18,000
ค่าขนส่งดินเหนียว (บาท)	11,000	6,600	5,500	4,400	3,300	2,200
ค่าแรงงานขนส่ง (บาท)	36,000	36,000	36,000	36,000	36,000	36,000
ค่าแรงงานคนคุมเครื่องจักรขึ้นรูป(บาท)	90,000	90,000	90,000	90,000	90,000	90,000
ค่าเครื่องขึ้นรูป (บาท)	20,000	20,000	20,000	20,000	20,000	20,000
ค่าไฟฟ้าเครื่องจักร (บาท)	55,800	55,800	55,800	55,800	55,800	55,800
ค่าเผาอิฐ(บาท)	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000
รวมราคาต้นทุน (บาท)	334,800	264,400	254,300	244,200	234,100	224,000
ต้นทุนต่อก้อน (บาท)	0.93	0.73	0.71	0.68	0.65	0.62
กำไรต่อก้อน(บาท)	0.27	0.47	0.49	0.52	0.55	0.58

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ผลของการทดลองจะพบว่า ที่สัดส่วนการผสมดินตะกอนต่อดินเหนียวอยู่ที่ 60:40 ให้ค่าคุณสมบัติเชิงกลที่รองรับความต้านแรงอัดได้มากสุด แต่ในทางกลับกัน อัตราส่วนดินตะกอนต่อดินเหนียวที่ 80:20 ให้ค่าต้นทุนที่ต่ำที่สุดแต่การทดสอบแรงกดต่ำสุด ซึ่งผ่านเกณฑ์มาตรฐานของประเทศไทยที่ สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรมได้กำหนดมาตรฐานในตารางที่ 2.2 ดังนั้นการนำอิฐดินเผาไปใช้งานให้คำนึงถึงประโยชน์ของการนำไปใช้ ถ้าต้องการประโยชน์ของการนำไปใช้ที่สามารถรองรับแรงอัดหรือแรงกด ให้เลือกใช้สัดส่วนที่สามารถทนแรงกดได้มาก แต่ถ้าต้องการต้นทุนต่ำให้ใช้สัดส่วนที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.13

นอกจากนี้ในตารางที่ 4.13 เห็นได้ว่าเมื่อใช้ดินเหนียวที่ไม่มีส่วนประกอบของดินตะกอนให้ค่าต้นทุนอยู่ที่ 0.93 บาทต่อก้อน ซึ่งสูงมากกว่าอิฐที่มีการผสมดินตะกอนที่ 0.73-.0.62 บาทต่อก้อน เพราะว่าในการทำอิฐของภาคกลางนั้นมีต้นทุนในส่วนของดินเหนียว แต่ในการทำอิฐที่เหมืองหินนั้นปริมาณดินเหนียวที่ใช้มีค่าลดลง ส่งผลให้ต้นทุนในส่วนของดินเหนียวมีค่าลดลง แต่จะเพิ่มในส่วนของค่าขนส่งดินเหนียวที่นำมาจากภาคกลางแทน ทำให้มีผลต่างของราคาต้นทุนของอิฐที่ผลิตจากดินเหนียว



	MPa / Baht
อิฐมอญ	28.38
อิฐผสมตะกอน80%	26.52
อิฐผสมตะกอน70%	20.73
อิฐผสมตะกอน60%	57.46
อิฐผสมตะกอน50%	55.40
อิฐผสมตะกอน40%	43.51
อิฐดินเผา	25.79

รูปที่ 4.18 เปรียบเทียบค่าของความต้านแรงอัดต่อราคาบาท

อิฐเป็นวัตถุดิบที่มีความหลากหลายของการนำไปใช้ ทำให้ถูกนำไปใช้ในงานที่แตกต่างกัน ใน บางครั้งการใช้อิฐที่มีคุณสมบัติที่เกินกว่าความต้องการใช้ประโยชน์ดังนั้นในรูปที่ 4.18 จึงได้ทำการ เปรียบเทียบค่าความต้านแรงอัดต่อราคาที่มีหน่วยเป็นบาท เพื่อแสดงให้เห็นถึงต้นทุนที่เปรียบเทียบ เมื่อนำไปใช้งานด้านการรองรับแรงอัด ในทางกลับกันถ้านำไปใช้งานกับที่ไม่ใช้คุณสมบัติเรื่องแรงกด จึงไม่จำเป็นต้องเลือกสัดส่วนที่มีความต้านแรงอัด จากรูปดังกล่าวจะเห็นได้ว่าที่สัดส่วนของการผสม ดินตะกอนที่ต่างกัน จะให้ผลของต้นทุนที่แตกต่างกันออกไป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 5
สรุปผลงานวิจัย

ในอุตสาหกรรมเหมืองหินส่วนหนึ่งของขั้นตอนของการเพิ่มมูลค่าให้หินคือการทำความสะอาดหินที่ดินทราย และดินตะกอนติดปนมาในหลังจากการระเบิดหิน และการลำเลียหินเข้าสู่การโม่หิน โดยหินที่ผ่านการลดขนาดจะถูกส่งไปทำความสะอาดด้วยน้ำ หลังจากที่ทำความสะอาดหินพบว่าน้ำที่ผ่านการใช้งานมีตะกอนสะสมอยู่ในน้ำ ตะกอนเหล่านี้เป็นตะกอนละเอียดขนาดเล็กที่ไม่เหมือนตะกอนดิน ซึ่งตะกอนนี้สามารถถูกพัดพาได้ง่ายด้วยการไหลของกระแสน้ำทำให้มีโอกาสที่ตะกอนจะไปขวางกั้นทางเกิดของกระแสน้ำและส่งผลให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงนำตะกอนมาเพิ่มมูลค่าด้วยการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์อิฐดินเผาที่ผสมดินเหนียวกับตะกอนที่ได้จากเหมืองหิน โดยหาสัดส่วนของตะกอนต่อดินเหนียวที่ให้ค่าความต้านแรงอัดสูงสุดอยู่ที่ 43.67 เมกกะพาสคาล อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาอยู่ที่ 1100 องศาเซลเซียส

5.1 สรุปผลงานวิจัย

5.1.1 ด้านการรวบรวมข้อมูลและการวิเคราะห์องค์ประกอบตะกอนและดินเหนียว

การวิเคราะห์คุณสมบัติองค์ประกอบของตะกอนที่ได้จากเหมืองด้วยเทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ หลังจากนั้นได้ทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ (X-ray Fluorescence Spectroscopy) ด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลออเรสเซนต์มิเตอร์ X-Ray Fluorescence Spectrometer เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณธาตุองค์ประกอบ พบว่าตะกอนที่ได้จากการล้างหินจะมีลักษณะเป็นตะกอนเนื้อละเอียด ขนาดเล็กสีน้ำตาล เมื่อนำไปวิเคราะห์หาธาตุที่เป็นองค์ประกอบพบว่ามีองค์ประกอบดังนี้ SiO_2 39.5% , CaO 26.5% , Al_2O_3 12.0% , MgO 4.41% , Fe_2O_3 1.91% และสารประกอบอื่น เมื่อไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบจากดินเหนียวพบว่ามี SiO2 61.5% , Al_2O_3 18.3% , Fe_2O_3 6.52% และสารประกอบอื่น จะเห็นได้ว่าทั้งดินเหนียวแล้วตะกอนที่ได้จากเหมืองหินมีองค์ประกอบของซิลิกอนไดออกไซด์เป็นหลัก ซึ่งสารประกอบนี้มีคุณสมบัติในเรื่องของโครงสร้างที่สามารถรองรอบแรงกดได้มาก นอกจากนี้ได้วิเคราะห์หาขนาดของอนุภาคของดินเหนียวและดินตะกอนที่ได้จากเหมือง พบว่ามีขนาดของอนุภาคที่ใกล้เคียงกันจะไม่ทำให้เกิดการแยกชั้นของดินตะกอน

5.1.2 การวิเคราะห์หน้าที่การใช้งาน

การวิเคราะห์หน้าที่ของสารประกอบแต่ละชนิดที่อยู่ภายในตะกอนมีหน้าที่ต่างกันไป ซิลิกอนไดออกไซด์ช่วยลดการหดตัวของโครงสร้าง เพิ่มความแข็ง (Hardness) และความแข็งแรง (Strength) ส่วนแคลเซียมออกไซด์ มีคุณสมบัติลดสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน ช่วยยึดติดหรือเป็นตัวประสาน (sintering) ระหว่างอนุภาค และอลูมิเนียมออกไซด์มีคุณสมบัติเพิ่มความทนไฟ ทนความร้อน ทนการกัดกร่อนจากสารเคมีและธรรมชาติ ส่วน Fe_2O_3 มีคุณสมบัติเพิ่มสีแดงปนส้มให้กับผลิตภัณฑ์และต้านจากแสงแดด ซึ่งเห็นได้ว่า สารประกอบแต่ละชนิดมีคุณสมบัติที่ต่างกันออกไป ดังนั้นในการทำอิฐต้องการคุณสมบัติในด้านของความแข็งแรง จำเป็นต้องเพิ่มองค์ประกอบซิลิกอนไดออกไซด์และอลูมิเนียมออกไซด์

5.1.3 ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกล

อัตราการดูดซึมน้ำที่อุณหภูมิการเผาเท่ากัน ปริมาณของตะกอนเพิ่มมากขึ้น ค่าอัตราการดูดซึมน้ำจะเพิ่มขึ้น แต่ในทางกลับกัน ถ้าปริมาณตะกอนคงที่และอุณหภูมิมีค่ามากขึ้น จะทำให้ค่าของอัตราการดูดซึมน้ำ ลดลง ค่าอัตราการดูดซึมน้ำมีค่ามากขึ้นตามความเข้มข้นของตะกอนที่เพิ่มมากขึ้น และที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียสมีค่าของอัตราการดูดซึมน้ำน้อยกว่าการเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เพราะว่ารูพรุนที่เกินขึ้นมีมากแต่เกิดกระบวนการเผาแบบซินเทอร์ทำให้ปริมาณของรูพรุนลดน้อยลง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

เมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่ 900 , 1000 และ1100 องศาเซลเซียส ค่าของความหนาแน่นจะมีค่าที่เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่ใช้ในการเผา แต่ถ้าที่อุณหภูมิเดียวกัน ค่าความหนาแน่นจะมีค่าลดลง เพราะซิลิกอนไดออกไซด์ที่อยู่ในดินจะเปลี่ยนเป็นเฟสของแก้วและเชื่อมระหว่างอนุภาคของอิฐ ส่งผลให้มีความหนาแน่นมากขึ้น แต่ในปริมาณอิฐที่มีส่วนผสมของตะกอนค่าของความหนาแน่นมีค่าไม่ต่างกันมาก

ค่าความต้านแรงอัด จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิของการเผา โดยที่อุณหภูมิที่ 1000 องศาเซลเซียส และ 1100 องศาเซลเซียส มีค่าที่ไม่ต่างกันมากนักเมื่อเทียบกับ 900 องศาเซลเซียส ที่เปอร์เซ็นต์ของตะกอนที่ 60% ที่อุณหภูมิการเผาที่ 1100 องศาเซลเซียส ให้ค่าของความต้านแรงอัดที่สูงที่สุด โดยมีอยู่ที่ 43.67 เมกกะพาสคาล โดยการเผาด้วยกระบวนการเผาแบบซินเทอร์จะเกิดที่อุณหภูมิมากกว่า 850 องศาเซลเซียส ซึ่งกระบวนการที่ของแข็งมีการเปลี่ยนสถานะกลายเป็นสภาวะ

ของเหลวก่อนที่จะเกิดกระบวนการหลอมเหลวโดยสภาวะนี้จะทำให้มีการเชื่อมกันหรือประสานกันของอนุภาคของแข็งที่เป็นแกนอยู่ จากการทดลองจะเห็นได้ชัดเจนที่ 1000 และ 1100 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าความต้านแรงอัดใกล้เคียงกัน

เมื่ออุณหภูมิของการเผาสูงมากขึ้น การสูญเสียน้ำหนักจะมีมากขึ้นเพราะการเผาด้วยอุณหภูมิที่สูงจะทำให้สารอินทรีย์เปลี่ยนเป็นแก๊สอื่น เช่น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ส่งผลให้น้ำหนักลดลง โดยเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียสค่า การสูญเสียน้ำหนักจะมีค่ามากที่สุด การลดลงของน้ำหนักเกิดจากเมื่อได้รับความร้อนจะเกิดการเปลี่ยนเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ ส่งผลให้เกิดการลดลงของน้ำหนัก นอกจากนี้ในตะกอนและในดินมีปริมาณของความชื้นจากน้ำสะสมอยู่ เมื่อได้รับความร้อนที่จะส่งผลให้เกิดการระเหยออกไป ทำให้น้ำหนักที่สูญเสียมีค่าเพิ่มขึ้นอีกด้วย การเผาเพราะว่าเผาที่ 900 องศาเซลเซียส มีการเปลี่ยนแปลงที่ไม่สมบูรณ์ส่งผลให้เมื่อเผาที่ 1100 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ค่าการสูญเสียน้ำหนักมีน้อยกว่า

โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่ากำลังขยายที่ 1,500 เท่า พื้นที่ผิวจะมีช่องว่างและการจัดเรียงที่แตกต่างกันไปตามชนิดของผลึก แสดงให้เห็นถึงความหลากหลายของผลึก โดยช่องว่างที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมี หรือเกิดการสลายตัวไปของแก๊สบางชนิด ทำให้เกิดลักษณะเป็นรูพรุน แต่เมื่อไปดูที่กำลังขยาย 6,000 เท่า จะเห็นผลึกของซิลิกอนไดออกไซด์และแคลเซียมออกไซด์ได้ไปแทรกหรือปิดช่องว่างรูพรุนที่เกิดขึ้นทำให้มีการเรียงตัวของซิลิกอนไดออกไซด์กับแคลเซียมออกไซด์หนาแน่นมากขึ้นและลดรูพรุนที่เกิด

5.1.4 ปัจจัยที่เกี่ยวข้องต่อคุณสมบัติเชิงกล

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

1.ปริมาณของตะกอน เป็นส่วนที่มีผลเพราะในตะกอนมีปริมาณของสารประกอบทีเป็นซิลิกอนไดออกไซด์และแคลเซียมคาร์บอเนต ซึ่งเป็นตัวแปรที่สำคัญที่ทำให้คุณสมบัติเชิงกลมีค่าต่างกันสังเกตได้จากในอิฐที่เป็นอิฐดินเผาที่ไม่มีปริมาณของตะกอนจากเหมืองมีคุณสมบัติของความต้านแรงอัด และอัตราการดูดซึมน้ำที่ต่างกันกับอิฐดินตะกอนจากเหมืองหิน การนำไปใช้งานในด้านของการรองรับน้ำหนักหรือความต้านแรงอัด ควรใช้อัตราส่วนของตะกอนต่อดินเหนียวที่ 60:40 ซึ่งให้ค่าความต้านแรงอัดสูงที่สุด จากปัจจัยที่เกี่ยวข้องจากการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่า อัตราการดูดซึมน้ำ ความต้านแรงอัด ความหนาแน่น และการสูญเสียน้ำหนัก มีผลต่อปริมาณสัดส่วนของตะกอนที่ผสม

2. อุณหภูมิของการเผา เมื่อเปรียบเทียบกับอิฐมอญที่มีการเผาที่อยู่ที่อุณหภูมิไม่เกิน 700 องศาเซลเซียส แต่ในอิฐดินตะกอนจากเหมืองหินและอิฐดินเผาที่มีการเผาในช่วงอุณหภูมิที่ 900-1100 องศาเซลเซียส ให้ค่าความต้านแรงอัด ที่ต่างกันมาก ซึ่งมาจากปัจจัยของอุณหภูมิในการเผา

ดังนั้นการนำไปใช้งานในด้านของการรองรับน้ำหนักหรือรองรับแรงอัด ควรใช้อุณหภูมิการเผาที่ 1100 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ปัจจัยที่เกี่ยวข้องจากการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่า อัตราการดูดซึมน้ำ ความต้านแรงอัด ความหนาแน่น และการสูญเสียน้ำหนัก มีผลต่ออุณหภูมิที่ใช้เผาอิฐ

5.1.6 สภาวะที่มีเหมาะสมในการผลิตอิฐดินตะกอนจากเหมืองหิน

กระบวนการวิเคราะห์ปัจจัยที่เกี่ยวข้องสามารถสรุปได้ว่าอุณหภูมิในการเผา และปริมาณของตะกอนมีผลต่อค่าคุณสมบัติเชิงทั้ง 4 ข้อโดยที่การผสมตะกอนต่อดินเหนียวที่ 60:40 ที่อุณหภูมิการเผาที่ 1100 องศาเซลเซียส ให้ค่าคุณสมบัติเชิงกลของค่าทดสอบความต้านแรงอัดสูงสุดที่เท่ากับ 43.67 เมกกะปาสคาล และค่าทดสอบอัตราการดูดซึมน้ำ เท่ากับ 11.53 % นอกจากนี้ยังพบว่าที่กระบวนการเผาที่ 1000 องศาเซลเซียส กับ 1100 องศาเซลเซียส ให้ค่าผลการทดสอบที่ใกล้เคียงกันอีกด้วย ดินตะกอนสามารถนำไปใช้เป็นส่วนประกอบแทนดินเหนียวในการทำอิฐซึ่งได้ โดยสัดส่วนของตะกอนจากเหมืองจะให้คุณสมบัติเชิงกลที่แตกต่างกันออกไป

5.1.7 การวิเคราะห์ต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์

การผสมดินตะกอนต่อดินเหนียวอยู่ที่ 60:40 ให้ค่าคุณสมบัติเชิงกลที่รองรับความต้านแรงอัดได้มากสุด ในทางกลับกัน อัตราส่วนดินตะกอนต่อดินเหนียวที่ 80:20 ให้ค่าต้นทุนที่ต่ำที่สุด แต่การทดสอบความต้านแรงอัดต่ำสุด แต่อิฐดินเผาที่ใช้ดินเหนียวที่ไม่มีส่วนประกอบของดินตะกอนให้ค่าต้นทุนที่สูงมากกว่าการทำอิฐที่มีการผสมดินตะกอน เพราะมีต้นทุนในส่วนของดินเหนียว แต่อิฐดินตะกอนจากเหมืองหินมีต้นทุนในส่วนของดินเหนียวมีค่าลดลง แต่จะเพิ่มในส่วนของค่าขนส่งดินเหนียวที่นำมาจากภาคกลางแทน ซึ่งอิฐดินเผาจะมีต้นทุนอยู่ที่ 0.19 บาท/ก้อน และอิฐที่ผสมตะกอน 60 เปอร์เซ็นต์จะมีราคาต้นทุนต่อก้อนอยู่ที่ 0.44 บาท/ก้อน ส่วนอิฐมอญจะมีราคาต้นทุนต่อก้อนอยู่ที่ 1.00 บาท

ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ก

คำอธิบายและคำย่อ

W คือ ความกว้างของอิฐ มีหน่วยเป็นเซนติเมตร

L คือ ความยาวของอิฐ มีหน่วยเป็นเซนติเมตร

H คือ ความสูงของอิฐ มีหน่วยเป็นเซนติเมตร

V คือ ปริมาตรของอิฐ มีหน่วยเป็นลูกบาศก์เซนติเมตร

Wt คือ น้ำหนักของอิฐ มีหน่วยเป็นกรัม

D คือ ความหนาแน่น มีหน่วยเป็นกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

D (ค่าเฉลี่ย) คือ ค่าเฉลี่ยความหนาแน่น มีหน่วยเป็นกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ผลการทดสอบ

ตาราง ก.1 ผลการทดสอบค่าความหนาแน่น (Bulk Density) ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส

%	W (cm.)	L (cm.)	H (cm.)	V (cm^3)	Wt (g)	D (g/cm^3)	**D** (ค่าเฉลี่ย) (g/cm^3)
0.00	4.52	4.51	2.27	46.27	70.73	1.53	1.51
	4.50	4.50	2.30	46.58	69.24	1.49	
40.00	4.55	4.53	2.33	48.02	68.50	1.43	1.42
	4.53	4.54	2.32	47.71	67.20	1.41	
50.00	4.53	4.58	2.27	47.10	66.22	1.41	1.41
	4.53	4.55	2.31	47.61	67.10	1.41	
60.00	4.56	4.55	2.30	47.72	66.49	1.39	1.40
	4.57	4.52	2.26	46.68	65.99	1.41	
70.00	4.54	4.64	2.24	47.19	65.10	1.38	1.35
	4.54	4.64	2.25	47.40	62.65	1.32	
80.00	4.57	4.55	2.29	47.62	62.53	1.31	1.33
	4.48	4.52	2.32	46.98	62.92	1.34	

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตาราง ก.2 ผลการทดสอบค่าความหนาแน่น (Bulk Density) ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส

%	W (cm.)	L (cm.)	H (cm.)	V (cm^3)	Wt (g)	D (g/cm^3)	**D** (ค่าเฉลี่ย) (g/cm^3)
0.00	4.62	4.52	2.24	46.78	70.80	1.51	1.48
	4.76	4.53	2.21	47.65	69.21	1.45	
40.00	4.56	4.54	2.31	47.82	67.33	1.41	1.41
	4.55	4.51	2.33	47.81	67.45	1.41	
50.00	4.59	4.49	2.27	46.78	66.11	1.41	1.40
	4.52	4.56	2.31	47.61	66.23	1.39	
60.00	4.51	4.50	2.28	46.27	65.11	1.41	1.40
	4.50	4.55	2.30	47.09	65.23	1.39	
70.00	4.58	4.53	2.34	48.55	64.30	1.32	1.34
	4.57	4.56	2.25	46.89	63.71	1.36	

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตาราง ก.3 ผลการทดสอบค่าความหนาแน่น (Bulk Density) ที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส

%	W (cm.)	L (cm.)	H (cm.)	V (cm^3)	Wt (g)	D (g/cm^3)	**D** (ค่าเฉลี่ย) (g/cm^3)
0.00	4.58	4.47	2.33	47.70	69.44	1.46	1.46
	4.52	4.56	2.28	46.99	69.01	1.47	
40.00	4.58	4.49	2.32	47.71	66.91	1.40	1.40
	4.57	4.51	2.29	47.20	66.03	1.40	
50.00	4.56	4.49	2.28	46.68	65.28	1.40	1.40
	4.55	4.46	2.29	46.47	65.14	1.40	
60.00	4.54	4.53	2.31	47.51	65.04	1.37	1.37
	4.56	4.52	2.28	46.99	64.60	1.37	
70.00	4.55	4.49	2.29	46.78	63.43	1.36	1.34
	4.52	4.52	2.33	47.60	62.75	1.32	
80.00	4.55	4.46	2.29	46.47	61.83	1.33	1.33
	4.56	4.46	2.27	46.17	60.95	1.32	

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ข

คำอธิบายและคำย่อ

W คือ ความกว้างของอิฐ มีหน่วยเป็นเซนติเมตร

L คือ ความยาวของอิฐ มีหน่วยเป็นเซนติเมตร

H คือ ความสูงของอิฐ มีหน่วยเป็นเซนติเมตร

V คือ ปริมาตรของอิฐ มีหน่วยเป็นลูกบาศก์เซนติเมตร

Wt F คือ น้ำหนักของอิฐก่อนแช่น้ำ มีหน่วยเป็นกรัม

Wt B คือ น้ำหนักของอิฐหลังแช่น้ำ มีหน่วยเป็นกรัม

Wt คือ น้ำหนักของน้ำที่ถูกดูดซึม มีหน่วยเป็นกรัม

%Wt คือ เปอร์เซ็นต์ของค่าการดูดซึมน้ำ

AVG %Wt คือ ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ของค่าการดูดซึมน้ำ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ผลการทดสอบ

ตารางที่ ข.1 แสดงผลการทดสอบดูดซึมน้ำ (Water Absorption) ที่อุณหภูมิ 900 °C

%	W (cm.)	L (cm.)	H (cm.)	V (cm^3)	Wt F (g)	Wt B (g)	Wt (g)	%Wt	AVG %Wt
0.00	4.52	4.51	2.27	46.27	70.73	76.55	5.82	8.23	8.66
	4.50	4.50	2.30	46.58	69.24	75.54	6.30	9.10	
40.00	4.55	4.53	2.33	48.02	68.50	76.93	8.43	12.31	12.75
	4.53	4.54	2.32	47.71	67.20	76.06	8.86	13.18	
50.00	4.53	4.58	2.27	47.10	66.22	75.56	9.34	14.10	13.86
	4.53	4.55	2.31	47.61	67.10	76.23	9.13	13.61	
60.00	4.56	4.55	2.30	47.72	66.49	76.78	10.29	15.48	15.64
	4.57	4.52	2.26	46.68	65.99	76.42	10.43	15.81	
70.00	4.54	4.64	2.24	47.19	65.10	75.05	9.95	15.28	17.66
	4.54	4.64	2.25	47.40	62.65	75.20	12.55	20.03	
80.00	4.57	4.55	2.29	47.62	62.53	74.53	12.00	19.19	18.98
	4.48	4.52	2.32	46.98	62.92	74.73	11.81	18.77	

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข.2 แสดงผลการทดสอบดูดซึมน้ำ (Water Absorption) ที่ อุณหภูมิ 1000 °C

%	W (cm.)	L (cm.)	H (cm.)	V (cm^3)	Wt F (g)	Wt B (g)	Wt (g)	%Wt	AVG %Wt
0.00	4.62	4.52	2.24	46.78	70.80	76.84	6.04	8.53	8.63
	4.76	4.53	2.21	47.65	69.21	75.25	6.04	8.73	
40.00	4.56	4.54	2.31	47.82	67.33	75.45	8.12	12.06	11.89
	4.55	4.51	2.33	47.81	67.45	75.36	7.91	11.73	
50.00	4.59	4.49	2.27	46.78	66.11	74.48	8.37	12.66	12.99
	4.52	4.56	2.31	47.61	66.23	75.05	8.82	13.32	
60.00	4.51	4.50	2.28	46.27	65.11	74.01	8.90	13.67	13.52
	4.50	4.55	2.30	47.09	65.23	73.95	8.72	13.37	
70.00	4.58	4.53	2.34	48.55	64.30	74.57	10.27	15.97	16.08
	4.57	4.56	2.25	46.89	63.71	74.02	10.31	16.18	
80.00	4.53	4.56	2.31	47.72	63.92	75.34	11.42	17.87	18.85
	4.54	4.47	2.29	46.47	62.27	74.62	12.35	19.83	

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข.3 แสดงผลการทดสอบดูดซึมน้ำ (Water Absorption) ที่ อุณหภูมิ 1100 °C

%	W (cm.)	L (cm.)	H (cm.)	V (cm^3)	Wt F (g)	Wt B (g)	Wt (g)	%Wt	AVG %Wt
0.00	4.58	4.47	2.33	47.70	69.44	75.35	5.91	8.51	8.05
	4.52	4.56	2.28	46.99	69.01	74.25	5.24	7.59	
40.00	4.58	4.49	2.32	47.71	66.91	73.44	6.53	9.76	10.70
	4.57	4.51	2.29	47.20	66.03	73.72	7.69	11.65	
50.00	4.56	4.49	2.28	46.68	65.28	73.29	8.01	12.27	12.34
	4.55	4.46	2.29	46.47	65.14	73.22	8.08	12.40	
60.00	4.54	4.53	2.31	47.51	65.04	72.14	7.10	10.92	11.53
	4.56	4.52	2.28	46.99	64.60	72.45	7.85	12.15	
70.00	4.55	4.49	2.29	46.78	63.43	72.54	9.11	14.36	15.13
	4.52	4.52	2.33	47.60	62.75	72.72	9.97	15.89	
80.00	4.55	4.46	2.29	46.47	61.83	72.13	10.30	16.66	16.87
	4.56	4.46	2.27	46.17	60.95	71.36	10.41	17.08	

ภาคผนวก ค

คำอธิบายและคำย่อ

Stroke คือ ความยาวของตัวกดที่กระทำต่อพื้นที่หน้าตัด มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร

Force คือ แรงที่กดหรือกระทำต่อพื้นที่หน้าตัดของวัสดุตัวอย่างในทิศตั้งฉาก มีหน่วยเป็น นิวตัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ผลการทดสอบ

ตารางที่ ค.1 ผลทดสอบความต้านแรงอัด ปริมาณตะกอน 0% อุณหภูมิ 900 °C

Stroke	Force	Stroke	Force	Stroke	Force
0.000	0.000	0.4	2354.56	0.67	36232.63
0.02	15.24	0.43	24568.03	0.7	39385.15
0.06	67.26	0.46	24895.04	0.73	40630.7
0.09	95.26	0.49	25895.04	0.76	40906.42
0.13	989.89	0.52	25031.2	0.67	36232.63
0.16	1045.23	0.55	25386.56	0.7	39385.15
0.19	1158.25	0.58	28734.25	0.73	40630.7
0.22	1356.25	0.61	31734.25	0.76	40906.42
0.25	1485.21	0.64	35938.62	0.67	36232.63
0.28	1524.37	0.67	36232.63	0.7	39385.15
0.31	1829.52	0.7	39385.15	0.73	40630.7
0.34	2038.26	0.73	40630.7	0.76	40906.42
0.37	2105.56	0.76	40906.42		

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ค.2 ผลทดสอบความต้านแรงอัด ปริมาณตะกอน 40% อุณหภูมิ 900°C

Stroke	Force	Stroke	Force	Stroke	Force	Stroke	Force
0.000	0.59	0.73	11,382.61	1.45	27,466.62	2.17	41,249.53
0.02	12.68	0.76	11,382.61	1.48	28,320.44	2.2	41,837.18
0.06	398.06	0.79	11,961.03	1.51	28,320.44	2.23	42,023.21
0.09	398.06	0.82	12,296.00	1.54	29,067.83	2.26	42,023.21
0.13	835.79	0.85	12,296.00	1.57	30,145.50	2.29	42,484.73
0.16	1,315.24	0.88	12,853.05	1.6	30,145.50	2.32	42,995.59
0.19	1,940.23	0.91	13,923.76	1.63	31,052.31	2.35	42,995.59
0.22	1,940.23	0.94	15,081.41	1.66	31,758.15	2.38	43,465.70
0.25	2,718.22	0.97	15,081.41	1.69	32,793.68	2.41	43,760.46
0.28	2,967.98	1.00	16,189.31	1.72	32,793.68	2.44	43,972.50
0.31	2,967.98	1.03	17,417.33	1.75	33,781.38	2.47	43,972.50
0.34	3,785.05	1.06	17,417.33	1.78	34,772.71	2.5	44,126.79
0.37	3,403.39	1.09	18,662.41	1.81	35,344.76	2.53	44,372.51
0.4	4,331.57	1.12	19,772.89	1.84	35,344.76	2.56	44,711.10
0.43	4,331.57	1.15	20,664.00	1.87	35,985.84	2.59	44,711.10
0.46	5,173.30	1.18	20,664.00	1.9	37,012.62	2.62	45,001.66
0.49	6,058.42	1.21	21,399.20	1.93	37,012.62	2.65	44,708.24
0.52	6,608.50	1.24	22,252.31	1.96	37,871.40	2.68	44,708.24
0.55	6,608.50	1.27	23,111.95	1.99	38,621.70	2.71	45,081.37
0.58	7,471.66	1.3	23,111.95	2.02	39,248.21	2.74	45,473.38
0.61	8,378.14	1.33	24,225.89	2.05	39,248.21	2.77	45,610.79
0.64	8,378.14	1.36	25,525.21	2.08	39,961.55	2.8	45,610.79
0.67	9,279.34	1.39	25,525.21	2.11	40,537.97	2.83	45,673.60
0.7	10,323.50	1.42	26,517.45	2.14	40,537.97	2.86	45,766.37

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ค.2 ผลทดสอบความต้านแรงอัด ปริมาณตะกอน40% อุณหภูมิ 900 °C

Stroke	Force	Stroke	Force	Stroke	Force	Stroke	Force
0.03	45,766.37	0.27	46,359.74	0.51	47,383.12	0.84	45,789.04
0.06	45,990.34	0.3	46,423.48	0.54	48,306.18	0.87	45,475.00
0.09	46,119.70	0.33	46,539.89	0.57	49,084.55	0.9	45,475.00
0.12	46,170.97	0.36	46,539.89	0.6	49775.65	0.93	45,355.09
0.15	46,170.97	0.39	46,661.20	0.63	48888.52	0.96	45,365.61
0.18	46,328.50	0.42	46,808.70	0.75	46,761.04	0.99	45,365.61
0.21	46,356.67	0.45	46,948.90	0.78	46,761.04	1.02	45,407.17
0.24	46,356.67	0.48	47,383.12	0.81	46,695.47		

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ค.3 ผลทดสอบความต้านแรงอัด ปริมาณตะกอน 50% อุณหภูมิ 900 °C

Stroke	Force	Stroke	Force	Stroke	Force	Stroke	Force
0	2.54	0.78	4,807.19	1.59	27,105.74	2.39	50,288.77
0.02	15.33	0.82	4,807.19	1.62	28,671.17	2.42	51,332.12
0.04	192.72	0.85	5,260.02	1.66	28,671.17	2.45	51,645.67
0.07	192.72	0.88	6,226.79	1.69	30,574.38	2.49	51,645.67
0.1	322.56	0.92	6,226.79	1.72	32,381.53	2.52	52,270.94
0.14	438.59	0.95	7,293.40	1.76	32,381.53	2.55	53,323.08
0.17	570.49	0.98	7,674.14	1.79	34,219.98	2.59	54,146.46
0.2	570.49	1.02	8,379.76	1.82	36,005.97	2.62	54,146.46
0.24	709.29	1.05	8,379.76	1.85	37,824.55	2.65	54,564.60
0.27	868.12	1.09	9,509.84	1.89	37,824.55	2.69	55,020.03
0.31	868.12	1.12	10,720.54	1.92	39,472.44	2.72	55,020.03
0.34	765.26	1.15	11,968.31	1.95	41,023.08	2.75	55,370.76
0.38	640.48	1.19	11,968.31	1.99	42,339.83	2.79	54,507.55
0.41	1,027.43	1.22	13,275.40	2.02	42,339.83	2.82	54,370.15
0.44	1,027.43	1.26	14,604.34	2.06	42,097.09	2.85	54,370.15
0.48	1,373.14	1.29	14,604.34	2.09	43,384.37	2.89	54,486.83
0.51	1,681.13	1.32	16,250.88	2.12	43,384.37	2.92	54,184.99
0.55	2,008.28	1.36	18,103.36	2.15	44,851.63	2.95	54,184.99
0.58	2,008.28	1.39	20,033.34	2.19	46,258.45	2.99	53,995.57
0.61	2,446.44	1.42	20,033.34	2.22	47,489.92	3.02	53,716.39
0.65	2,986.17	1.45	22,046.05	2.25	47,489.92	3.06	53,318.76
0.68	2,986.17	1.49	23,996.96	2.29	48,685.68	3.09	53,318.76
0.71	3,543.65	1.52	23,996.96	2.32	49,470.31	3.12	52,893.39
0.75	4,198.87	1.55	25,938.43	2.35	49,470.31	3.16	52,401.75

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ค.3 ผลทดสอบความต้านแรงอัด ปริมาณตะกอน 50% อุณหภูมิ 900 ℃

Stroke	Force	Stroke	Force	Stroke	Force	Stroke	Force
3.19	52,401.75	3.26	50,780.58	3.32	50,586.73	3.39	49,604.85
3.22	51,425.27	3.29	50,586.73	3.36	50,118.99		

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ค.4 ผลทดสอบความต้านแรงอัด ปริมาณตะกอน 60% อุณหภูมิ 900 °C

Stroke	Force	Stroke	Force	Stroke	Force	Stroke	Force
0	2.37	0.78	21,449.60	1.6	49,216.55	2.4	72,472.54
0.01	58.01	0.82	21,671.68	1.64	51,227.64	2.43	71,472.10
0.04	771.52	0.85	21,671.41	1.67	51,227.64	2.47	70,775.65
0.08	771.52	0.89	22,766.78	1.7	52,947.09	2.5	70,775.65
0.11	1,891.28	0.92	22,766.78	1.74	54,327.25	2.53	70,596.48
0.15	2,982.98	0.96	24,366.48	1.77	54,327.25	2.56	69,910.83
0.18	4,021.10	0.99	25,769.79	1.8	55,254.78	2.6	69,910.83
0.21	4,021.10	1.02	26,901.91	1.84	57,074.02	2.63	69,190.15
0.24	4,799.41	1.06	26,901.91	1.87	58,619.32	2.66	69,110.33
0.27	5,845.08	1.09	27,995.93	1.9	58,619.32	2.7	68,867.64
0.3	5,845.08	1.13	29,413.87	1.94	60,266.18	2.73	68,867.64
0.34	6,801.17	1.16	29,413.87	1.97	62,020.93	2.77	68,748.54
0.37	7,949.32	1.2	31,033.21	2	62,020.93	2.8	68,612.00
0.41	9,400.61	1.23	32,848.67	2.04	63,822.14	2.83	68,612.00
0.44	9,400.61	1.26	34,888.74	2.07	65,426.85	2.87	68,649.94
0.47	11,221.08	1.3	34,888.74	2.1	66,794.06	2.9	68,842.71
0.51	13,013.82	1.33	36,848.13	2.14	66,794.06	2.93	68,681.67
0.54	13,013.82	1.37	38,772.33	2.17	68,298.12	2.97	68,681.67
0.58	14,577.85	1.4	38,772.33	2.2	69,881.52	3	68,458.46
0.61	16,474.74	1.43	40,718.49	2.23	69,881.52	3.04	68,078.15
0.65	18,298.89	1.47	42,816.25	2.27	71,000.16	3.07	68,078.15
0.68	18,298.89	1.5	44,899.50	2.3	71,708.26	3.1	67,796.77
0.71	20,113.26	1.54	44,899.50	2.34	72,239.89	3.14	67,659.53
0.75	21,449.60	1.57	46,947.07	2.37	72,239.89	3.17	67,080.89

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ค.4 ผลทดสอบความต้านแรงอัด ปริมาณตะกอน 60% อุณหภูมิ 900 ℃

Stroke	Force	Stroke	Force	Stroke	Force	Stroke	Force
3.2	67,080.89	3.53	65,657.62	3.83	63,071.51	4.13	59,858.78
3.24	66,770.64	3.56	65,657.62	3.86	62,821.48	4.16	58,763.90
3.27	66,538.63	3.59	65,181.62	3.89	62,821.48	4.19	58,763.90
3.31	66,413.91	3.62	64,632.67	3.92	62,504.42	4.22	58,274.52
3.34	66,413.91	3.65	64,632.67	3.95	62,115.04	4.25	57,362.42
3.37	66,303.28	3.68	64,399.37	3.98	62,115.04	4.28	56,684.92
3.41	66,235.98	3.71	64,088.03	4.01	61,461.77	4.31	56702.4
3.44	66,235.98	3.74	63,744.86	4.04	61,037.48		
3.47	66,295.99	3.77	63,744.86	4.07	60,649.73		
3.5	65,790.65	3.8	63,485.27	4.1	60,649.73		

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ค.5 ผลทดสอบความต้านแรงอัด ปริมาณตะกอน 70% อุณหภูมิ 900 °C

Stroke	Force	Stroke	Force	Stroke	Force	Stroke	Force
0	0	0.83	8734.25	1.66	19950.45	2.49	27319.98
0.02	11.12	0.86	8808.94	1.7	20402.69	2.52	27319.98
0.05	290.23	0.89	8938.62	1.73	20402.69	2.56	27415.45
0.08	568.16	0.93	9653.93	1.76	20620.67	2.59	27443.36
0.12	568.16	0.96	9906.42	1.79	20620.67	2.63	27453.83
0.15	720.13	0.99	9906.42	1.83	20621.48	2.66	28275.21
0.18	734.25	1.03	10671.45	1.86	20895.04	2.69	28508.41
0.22	804.92	1.06	10895.04	1.9	21031.2	2.72	28862.16
0.25	2474.72	1.1	11231.39	1.93	21506.1	2.76	28862.16
0.29	2474.72	1.13	11231.39	1.96	22224.84	2.79	29006.63
0.32	4797.26	1.16	12580.36	1.99	22224.84		
0.36	4958	1.2	12804.92	2.03	23274.18		
0.39	6372.32	1.23	14422.8	2.06	23867.91		
0.42	6750.01	1.26	15820.98	2.09	24266.2		
0.46	7074.59	1.3	15820.98	2.12	24409.15		
0.49	7145.4	1.33	17044.26	2.16	24958		
0.53	7825.49	1.36	17044.26	2.19	25043.28		
0.56	8040.15	1.4	17097.1	2.23	25043.28		
0.59	8040.15	1.43	17145.4	2.26	25609.17		
0.63	8076.39	1.46	17403.08	2.29	26048.04		
0.66	8076.39	1.5	18876.93	2.32	26372.32		
0.7	8201.81	1.53	19041.48	2.36	26616.48		
0.73	8314.87	1.56	19232.63	2.39	26616.48		
0.76	8314.87	1.6	19232.63	2.42	27140.59		
0.8	8380.76	1.63	19630.7	2.45	27276.7		

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ค.6 ผลทดสอบความต้านแรงอัด ปริมาณตะกอน 80% อุณหภูมิ 900 °C

Stroke	Force	Stroke	Force	Stroke	Force
0	253.63	0.82	4,383.12	1.66	16,661.20
0.02	357.56	0.86	6,135.97	1.69	16,808.70
0.06	442.47	0.89	9,102.80	1.72	16,948.90
0.09	468.31	0.92	9,520.89	1.75	17,383.12
0.13	515.93	0.96	9,868.31	1.79	17,383.12
0.16	612.98	0.99	9,884.09	1.82	18,676.28
0.19	616.5	1.02	10,276.05	1.86	18,399.37
0.22	616.5	1.06	10,276.05	1.89	18,088.03
0.26	636.02	1.09	10,370.92	1.92	17,744.86
0.29	636.02	1.12	10,604.22	1.95	17,744.86
0.32	809.99	1.16	10,604.22	1.99	17,485.27
0.36	824.38	1.19	11,473.64	2.02	16,071.51
0.39	974.77	1.22	14,389.97	2.06	16,821.48
0.42	1,833.98	1.26	16,046.12	2.09	16,821.48
0.46	1,833.98	1.29	16,126.85	2.12	15,504.42
0.49	2,206.51	1.32	16,126.85	2.16	15,115.04
0.53	2,862.16	1.35	16,186.49	2.19	15,115.04
0.56	3,086.25	1.39	16,207.21		
0.59	3,292.28	1.42	16,310.50		
0.62	3,292.28	1.45	16,312.39		
0.66	3,930.93	1.49	16,317.36		
0.69	4084.55	1.52	16,317.36		
0.72	4,132.95	1.56	16,458.54		
0.76	4,306.18	1.59	16,539.89		
0.79	4,383.12	1.62	16,539.89		

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ค.7 ผลทดสอบความต้านแรงอัด ปริมาณตะกอน 0% อุณหภูมิ 1000 °C

Stroke	Force	Stroke	Force	Stroke	Force
0	0	0.76	28,972.50	1.51	47,044.26
0.02	92.76	0.79	29,102.80	1.54	47,097.10
0.06	252.56	0.82	29,102.80	1.57	47,145.40
0.09	339.59	0.85	29,520.89	1.6	51344.64
0.13	456	0.88	29,884.09	1.63	50974.77
0.16	630.70	0.91	29,918.52	1.66	50,357.56
0.19	2,906.42	0.94	30,069.19	1.69	49,616.50
0.22	5,906.42	0.97	30,196.88	1.72	49,616.50
0.25	9,950.45	1	30,276.05		
0.28	10,290.23	1.03	30,276.05		
0.31	13,568.16	1.06	30,373.89		
0.34	13,568.16	1.09	30,373.89		
0.37	14,720.13	1.12	30,470.12		
0.4	14,804.92	1.15	30,587.22		
0.43	16,804.92	1.18	30,686.04		
0.46	16,389.26	1.21	30,686.04		
0.49	17,292.28	1.24	43,465.70		
0.52	18,292.28	1.27	43,760.46		
0.55	21,930.93	1.3	43,972.50		
0.58	23,426.56	1.33	44,126.79		
0.61	25,881.25	1.36	44,372.51		
0.64	23,054.81	1.39	44,711.10		
0.67	26,054.81	1.42	44,711.10		
0.7	26,185.46	1.45	45,001.66		
0.73	26,349.53	1.48	47,044.26		

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ค.8 ผลทดสอบความต้านแรงอัด ปริมาณตะกอน 40% อุณหภูมิ 1000 °C

Stroke	Force	Stroke	Force
0	5.45	0.73	50,720.13
0.02	28.39	0.76	50,671.45
0.06	2610.18	0.79	50,621.48
0.09	2610.18	0.82	50,620.67
0.13	7871.07	0.85	50,620.67
0.16	15184.49	0.88	50,568.16
0.19	24320.77	0.91	50,568.16
0.22	24320.77	0.94	50,290.23
0.25	35863.98	0.97	49,950.45
0.28	48278.93	1	49,906.42
0.31	48278.93	1.03	49,906.42
0.34	60742.28	1.06	49,630.70
0.37	63025.59	1.09	49,385.15
0.4	64259.21	1.12	49,232.63
0.43	65234.25	1.15	48,938.62
0.46	68940.66	1.18	48,734.25
0.49	63215.26	1.21	48,734.25
0.52	58643.45		
0.55	55264.20		
0.58	51,031.20		
0.61	50,895.04		
0.64	50,895.04		
0.67	50,804.92		
0.7	50,804.92		

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ค.9 ผลทดสอบความต้านแรงอัด ปริมาณตะกอน 50% อุณหภูมิ 1000 °C

Stroke	Force	Stroke	Force	Stroke	Force
0	3.56	0.76	29,375.23	1.51	73,387.61
0.03	24.45	0.79	31,473.69	1.54	76,082.09
0.06	711.88	0.82	33,438.15	1.57	78,926.81
0.1	711.88	0.85	33,438.15	1.6	81,964.14
0.13	1,885.29	0.88	35,593.66	1.63	81,964.14
0.16	3,023.46	0.91	37,898.92	1.66	84,827.59
0.19	4,236.59	0.94	40,289.62	1.69	87,583.59
0.22	4,236.59	0.97	40,289.62	1.72	87,583.59
0.25	5,661.70	1	42,804.92		
0.28	7,265.72	1.03	45,346.62		
0.31	7,265.72	1.06	45,346.62		
0.34	8,803.14	1.09	47,906.88		
0.37	10,374.34	1.12	50,486.94		
0.4	12,281.43	1.15	53,008.61		
0.43	12,281.43	1.18	53,008.61		
0.46	14,201.37	1.21	55,585.71		
0.49	16,203.23	1.24	58,155.14		
0.52	16,203.23	1.27	60,363.54		
0.55	18,217.34	1.3	60,363.54		
0.58	20,279.05	1.33	62,898.76		
0.61	22,488.25	1.36	65,403.11		
0.64	22,488.25	1.39	65,403.11		
0.67	24,740.09	1.42	68,118.36		
0.7	27,122.69	1.45	70,770.53		
0.73	29,375.23	1.48	73,387.61		

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ค.10 ผลทดสอบความต้านแรงอัด ปริมาณตะกอน 60% อุณหภูมิ1000 ℃

Stroke	Force	Stroke	Force	Stroke	Force
0	5.38	0.81	27,769.33	1.62	70,976.68
0.01	327.85	0.84	29,729.52	1.66	72,909.62
0.04	327.85	0.87	29,729.52	1.69	72,909.62
0.08	1,061.59	0.9	32,041.05	1.73	74,500.90
0.11	2,145.04	0.94	34,460.08	1.76	78,891.24
0.14	3,441.65	0.97	36,806.41	1.79	88,403.73
0.17	3,441.65	1	36,806.41	1.82	88,403.73
0.21	5,100.12	1.04	39,404.77	1.86	86,836.03
0.24	6,786.38	1.07	42,033.94		
0.28	6,786.38	1.1	44,649.95		
0.31	8,574.58	1.13	44,649.95		
0.34	10,410.82	1.17	47,158.03		
0.37	11,917.10	1.2	49,677.05		
0.41	11,917.10	1.23	49,677.05		
0.44	13,395.21	1.26	52,213.78		
0.47	14,664.46	1.3	54,746.47		
0.51	16,330.70	1.33	57,336.89		
0.54	16,330.70	1.37	57,336.89		
0.57	18,339.85	1.4	59,743.78		
0.61	20,360.76	1.43	62,257.30		
0.64	20,360.76	1.46	62,257.30		
0.67	21,888.52	1.49	64,641.52		
0.71	23,591.56	1.53	66,950.02		
0.74	25,649.17	1.56	69,036.02		
0.77	25,649.17	1.59	69,036.02		

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ค.11 ผลทดสอบความต้านแรงอัด ปริมาณตะกอน 70% อุณหภูมิ 1000 °C

Stroke	Force	Stroke	Force	Stroke	Force	Stroke	Force
0	0	0.84	25,043.28	1.67	38,584.31	2.43	49,906.42
0.03	11.12	0.87	26,048.04	1.71	39,658.04	2.46	49,950.45
0.06	2,474.72	0.91	26,616.48	1.74	40,688.00	2.49	50,290.23
0.1	2,474.72	0.94	26,616.48	1.77	41,457.52	2.52	50,568.16
0.13	4,797.26	0.98	27,453.83	1.8	41,457.52	2.55	50,568.16
0.16	6,750.01	1.01	28,508.41	1.83	42,209.28	2.58	50,720.13
0.2	8,040.15	1.04	28,862.16	1.87	43,008.05	2.61	50,804.92
0.23	8,040.15	1.08	28,862.16	1.9	43,008.05	2.64	50,804.92
0.27	9,653.93	1.11	27,443.36	1.93	43,867.91	2.67	50,671.45
0.3	11,231.39	1.14	28,275.21	1.96	44,409.15	2.7	50,621.48
0.33	11,231.39	1.17	29,006.63	2	44,958.00	2.73	50,895.04
0.37	12,580.36	1.21	29,006.63	2.03	44,958.00	2.76	50,895.04
0.4	14,422.80	1.24	30,231.15	2.07	45,609.17	2.79	51,031.20
0.44	15,820.98	1.27	31,570.99	2.1	46,372.32	2.82	50,620.67
0.47	15,820.98	1.31	31,570.99	2.13	46,372.32	2.85	50,620.67
0.5	17,403.08	1.34	32,647.91	2.13	47,074.59	2.88	49,385.15
0.54	18,876.93	1.38	33,625.85	2.16	47,825.49	2.91	48,938.62
0.57	20,402.69	1.41	34,651.61	2.19	48,314.87	2.94	48,734.25
0.61	20,402.69	1.44	34,651.61	2.22	48,314.87	2.97	48,734.25
0.64	21,506.10	1.47	35,459.93	2.25	48,808.94	3	48,380.76
0.68	22,224.84	1.51	35,859.93	2.28	49,041.48	3.03	48,201.81
0.71	22,224.84	1.54	35,859.93	2.31	49,232.63	3.06	48,076.39
0.74	23,274.18	1.57	36,418.22	2.34	49,232.63	3.09	48,076.39
0.78	24,266.20	1.6	37,676.79	2.37	49,630.70	3.12	47,691.71
0.81	25,043.28	1.64	38,584.31	2.4	49,906.42	3.15	47,519.88

ตารางที่ ค.11 ผลทดสอบความต้านแรงอัด ปริมาณตะกอน 70% อุณหภูมิ 1000 ℃

Stroke	Force
3.18	47,519.88
3.21	47,499.04
3.24	47,493.97
3.27	47,647.40
3.3	47,647.40
3.33	47,546.43
3.36	47,405.52
3.39	47,405.52
3.42	47,395.97
3.45	47,415.45
3.48	47,319.98
3.51	47,319.98
3.54	47,140.59
3.57	47,276.70
3.6	47,044.26
3.63	47,044.26
3.66	47,097.10
3.69	47,145.40
3.72	47,145.40
3.75	46,963.10
3.78	46,356.13
3.81	45,918.51

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ค.12 ผลทดสอบความต้านแรงอัด ปริมาณตะกอน 80% อุณหภูมิ 1000 °C

Stroke	Force	Stroke	Force	Stroke	Force	Stroke	Force
0	0	0.82	2,912.94	1.66	10,780.01	2.49	22,315.99
0.02	10.36	0.86	3,298.42	1.69	11,322.06	2.53	22,875.95
0.06	101.84	0.89	3,732.00	1.72	11,974.47	2.56	23,477.69
0.09	101.84	0.92	3,732.00	1.75	12,607.12	2.59	24,028.32
0.13	184.14	0.96	4,202.97	1.79	12,607.12	2.63	24,028.32
0.16	231.41	0.99	4,668.11	1.82	13,199.47	2.66	24,664.97
0.19	321.97	1.02	5,091.54	1.86	13,868.50	2.69	25,254.29
0.22	321.97	1.06	5,091.54	1.89	13,868.50	2.73	25,254.29
0.26	454.94	1.09	5,547.83	1.92	14,565.16	2.76	25,758.34
0.29	586.73	1.12	5,985.40	1.95	15,248.71	2.79	26,207.19
0.32	586.73	1.16	6,293.28	1.99	15,961.73	2.83	26,694.19
0.36	758.89	1.19	6,293.28	2.02	15,961.73	2.86	26,694.19
0.39	903.3	1.22	6,698.79	2.06	16,694.28	2.9	27,208.55
0.42	988.46	1.26	7,108.35	2.09	17,327.96	2.93	27,587.94
0.46	988.46	1.29	7,108.35	2.12	17,327.96	2.96	27,587.94
0.49	1,164.34	1.32	7,569.23	2.16	17,942.38	2.99	28,141.54
0.53	1,363.54	1.35	8,055.80	2.19	18,505.09	3.03	28,596.59
0.56	1,575.79	1.39	8,416.14	2.22	19,176.07	3.06	29,102.80
0.59	1,575.79	1.42	8,416.14	2.25	19,176.07	3.1	29,102.80
0.62	1,790.85	1.45	8,762.12	2.29	19,789.19	3.13	29,520.89
0.66	2,052.00	1.49	9,122.57	2.32	20,448.56	3.17	29,884.09
0.69	2,052.00	1.52	9,122.57	2.36	20,448.56	3.2	30,276.05
0.72	2,263.12	1.56	9,644.11	2.39	21,072.86	3.23	30,276.05
0.76	2,528.63	1.59	10,194.84	2.42	21,683.76	3.26	30,370.92
0.79	2,912.94	1.62	10,780.01	2.46	22,315.99	3.3	30,604.22

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ค.12 ผลทดสอบความต้านแรงอัด ปริมาณตะกอน 80% อุณหภูมิ 1000 °C

Stroke	Force	Stroke	Force
3.33	30,604.22	4.19	31,867.17
3.36	30,882.97	4.22	31,668.67
3.4	31,087.93	4.25	31,338.83
3.43	31,190.20	4.28	31,338.83
3.47	31,190.20	4.31	30,864.40
3.5	31,356.15	4.34	30,686.04
3.53	31,588.37	4.37	30,686.04
3.57	31,588.37	4.4	30,587.22
3.6	31,659.18	4.43	30,470.12
3.63	31,774.94	4.46	30,373.89
3.67	31,946.50	4.49	30,373.89
3.7	31,946.50	4.52	30,196.88
3.73	32,044.23	4.55	30,069.19
3.77	32,086.76	4.58	29,918.52
3.8	32,086.76		
3.84	32,132.20		
3.87	32,158.05		
3.9	32,189.94		
3.93	32,189.94		
3.97	32,186.44		
4	32,210.56		
4.04	32,086.87		
4.07	32,086.87		
4.1	31,997.82		
4.13	31,898.14		
4.16	31,898.14		

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ค.13 ผลทดสอบความต้านแรงอัด ปริมาณตะกอน 0% อุณหภูมิ 1100 °C

Stroke	Force	Stroke	Force
0	16.57	0.76	19,772.89
0.02	85.38	0.79	22,488.25
0.06	327.85	0.82	24,740.09
0.09	711.88	0.85	27,122.69
0.13	711.88	0.88	29,375.23
0.16	1,885.29	0.91	32966.69
0.19	3,023.46	0.94	35553.07
0.22	345.5	0.97	37887.48
0.25	1,383.94	1	37887.48
0.28	2,704.73	1.03	39,404.77
0.31	4,019.64	1.06	42,033.94
0.34	5,661.70	1.09	44,649.95
0.37	7,265.72	1.12	44,649.95
0.4	7,265.72	1.15	47,158.03
0.43	8,803.14	1.18	50,486.94
0.46	11051.09	1.21	53,008.61
0.49	11051.09	1.24	53324.56
0.52	12947.82	1.27	49,084.55
0.55	13,923.76	1.3	49775.65
0.58	15,081.41	1.33	48888.52
0.61	15,081.41	1.36	47945.63
0.64	16,189.31		
0.67	17,417.33		
0.7	17,417.33		
0.73	18,662.41		

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ค.14 ผลทดสอบความต้านแรงอัด ปริมาณตะกอน 40% อุณหภูมิ1100 °C

Stroke	Force	Stroke	Force	Stroke	Force
0.03	427.1	0.88	26,777.41	1.72	72,472.54
0.06	427.1	0.91	26,777.41	1.76	71,056.53
0.1	990.89	0.95	28,698.05	1.79	70,564.23
0.13	1812.65	0.98	30,758.73	1.83	69,563.53
0.16	3010.89	1.01	32,966.69	1.86	68,479.02
0.2	3,010.89	1.05	32,966.69	1.89	66,482.12
0.23	4,392.39	1.08	35,553.07	1.92	65,482.15
0.27	5,828.84	1.12	37,887.48	1.96	64,259.13
0.3	5,828.84	1.15	37,887.48	1.99	58,581.70
0.33	7,462.16	1.18	40,538.30	2.03	58,337.50
0.37	9,193.37	1.22	43,352.31	2.06	58,337.50
0.4	11,051.09	1.25	46,118.19	2.09	58,082.45
0.43	11,051.09	1.29	46,118.19	2.12	58,035.07
0.47	12,947.82	1.32	49,044.34	2.15	57,859.30
0.5	14,868.40	1.35	51,586.36		
0.54	16,210.30	1.39	54,283.91		
0.57	16,210.30	1.42	54,283.91		
0.6	17,189.10	1.45	57,045.52		
0.64	18,828.84	1.49	59,873.62		
0.67	18,828.84	1.52	59,873.62		
0.7	20,526.60	1.55	62,533.13		
0.74	22,355.49	1.59	65,304.56		
0.77	23,370.24	1.62	68,086.09		
0.81	23,370.24	1.66	68,086.09		
0.84	24,775.44	1.69	70,863.94		

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ค.15 ผลทดสอบความต้านแรงอัด ปริมาณตะกอน 50% อุณหภูมิ 1100 °C

Stroke	Force	Stroke	Force	Stroke	Force
0	2.27	0.82	29,800.22	1.64	75,444.09
0.03	278.26	0.85	32,355.52	1.68	77,967.87
0.06	278.26	0.89	34,879.13	1.71	80,504.97
0.09	1,134.18	0.92	34,879.13	1.74	80,504.97
0.12	2,201.00	0.95	37,292.33	1.78	82,832.09
0.15	3,364.16	0.98	39,586.05	1.81	84,969.25
0.19	3,364.16	1.02	39,586.05	1.84	86,871.97
0.22	4,611.82	1.05	42,137.18	1.87	86,871.97
0.26	5,996.25	1.09	44,437.75	1.91	88,469.03
0.29	7,468.63	1.12	46,884.30		
0.32	7,468.63	1.15	46,884.30		
0.36	8,809.83	1.18	49,550.66		
0.39	9,934.45	1.22	52,282.59		
0.42	9,934.45	1.25	55,007.72		
0.46	11,491.08	1.28	55,007.72		
0.49	13,441.94	1.31	57,718.71		
0.52	15,511.91	1.35	60,591.17		
0.56	15,511.91	1.38	60,591.17		
0.59	17,703.20	1.41	63,219.05		
0.62	19,969.60	1.45	65,861.18		
0.66	19,969.60	1.48	68,410.65		
0.69	22,362.89	1.51	68,410.65		
0.72	24,899.29	1.54	70,895.35		
0.76	27,314.87	1.58	73,326.36		
0.79	27,314.87	1.61	73,326.36		

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ค.16 ผลทดสอบความต้านแรงอัด ปริมาณตะกอน 60% อุณหภูมิ 1100 °C

Stroke	Force	Stroke	Force	Stroke	Force
0	13.49	0.85	37,406.15	1.67	82,539.75
0.03	345.5	0.89	37,406.15	1.7	82,539.75
0.06	345.5	0.92	40,023.13	1.74	84,306.75
0.09	1,383.94	0.96	42,540.75	1.77	86,003.42
0.13	2,704.73	0.99	45,157.89	1.81	87,406.25
0.16	4,019.64	1.02	45,157.89	1.84	87,406.25
0.19	4,019.64	1.05	47,888.58	1.88	88,634.98
0.22	5,503.63	1.09	50,629.58	1.91	89,810.44
0.26	6,974.83	1.12	53,460.48		
0.29	6,974.83	1.15	53,460.48		
0.32	8,616.46	1.18	56,078.38		
0.36	10,602.51	1.22	58,850.73		
0.39	12,743.17	1.25	58,850.73		
0.42	12,743.17	1.28	61,582.98		
0.46	14,833.97	1.31	64,308.06		
0.49	17,237.30	1.35	66,598.48		
0.52	19,836.84	1.38	66,598.48		
0.56	19,836.84	1.41	69,020.04		
0.59	22,425.71	1.44	71,559.74		
0.62	25,072.58	1.48	71,559.74		
0.66	25,072.58	1.51	73,829.01		
0.69	27,506.24	1.54	76,366.06		
0.72	29,676.96	1.58	78,615.85		
0.76	32,156.97	1.61	78,615.85		

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ค.1 ผลทดสอบความต้านแรงอัด ปริมาณตะกอน 70% อุณหภูมิ 1100 °C

Stroke	Force	Stroke	Force	Stroke	Force	Stroke	Force
0	9.34	0.81	22,420.20	1.64	43,086.25	2.47	56,612.98
0.03	287.81	0.84	23,662.69	1.67	44,132.95	2.51	56,636.02
0.06	287.81	0.88	23,662.69	1.71	44,132.95	2.54	56,636.02
0.09	829.48	0.91	24,908.25	1.74	45,253.63	2.57	56,974.77
0.12	1,141.73	0.95	26,046.69	1.78	46,442.47	2.61	57,357.56
0.15	1,728.84	0.98	27,295.33	1.81	47,383.12	2.64	57,616.50
0.19	1,728.84	1.01	27,295.33	1.84	47,383.12	2.67	57,616.50
0.22	2,771.49	1.04	28,026.32	1.87	48,306.18	2.71	57,824.38
0.25	4,085.86	1.08	29,010.73	1.9	49,084.55	2.74	58,313.11
0.29	4,085.86	1.11	29,010.73	1.94	49,868.31	2.77	58,454.02
0.32	5,492.14	1.14	30,326.67	1.97	49,868.31	2.81	58,454.02
0.35	6,971.65	1.18	31,607.53	2	50,809.99	2.84	58,581.70
0.38	8,059.57	1.21	32,887.42	2.04	51,515.93	2.87	58,337.50
0.42	8,059.57	1.25	32,887.42	2.07	51,515.93	2.91	58,337.50
0.45	9,416.36	1.28	34,171.03	2.1	52,233.97	2.94	58,082.45
0.48	10,819.57	1.31	35,281.78	2.14	52,823.94	2.97	58,035.07
0.52	12,299.73	1.34	36,197.23	2.17	53,563.07	3.01	57,859.30
0.55	12,299.73	1.38	36,197.23	2.2	53,563.07	3.04	57,859.30
0.58	13,929.91	1.41	37,413.05	2.24	54,278.35		
0.61	15,714.77	1.44	38,762.29	2.27	54,770.48		
0.65	15,714.77	1.48	38,762.29	2.3	54,770.48		
0.68	17,477.77	1.51	39,965.65	2.34	55,341.24		
0.71	19,208.45	1.54	41,127.35	2.37	55,766.66		
0.75	20,860.12	1.57	42,247.39	2.41	56,438.18		
0.78	20,860.12	1.61	42,247.39	2.44	56,438.18		

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ค.18 ผลทดสอบความต้านแรงอัด ปริมาณตะกอน 80% อุณหภูมิ 1100 °C

Stroke	Force	Stroke	Force	Stroke	Force	Stroke	Force
0	0	0.82	3,952.51	1.67	5,740.76	2.51	19,713.04
0.01	12.47	0.86	4,475.18	1.71	6,543.47	2.55	20,298.70
0.04	283.76	0.89	1,116.74	1.74	7,310.13	2.58	20,605.61
0.08	283.76	0.92	1,116.74	1.77	7,310.13	2.62	21,044.74
0.1	612.53	0.96	1,273.46	1.81	7,983.48	2.65	21,044.74
0.13	920.14	0.99	975.94	1.84	8,734.81	2.68	21,294.28
0.16	1,249.02	1.03	1,157.92	1.88	9,843.46	2.72	22,094.24
0.2	1,249.02	1.06	1,157.92	1.91	9,843.46	2.75	22,094.24
0.23	1,542.11	1.09	1,293.76	1.94	10,934.41	2.78	22,873.47
0.27	1,764.84	1.13	1,475.09	1.98	11,912.13	2.81	23,681.31
0.3	1,764.84	1.16	1,475.09	2.01	12,936.97	2.85	24,581.91
0.34	1,647.67	1.2	1,658.20	2.04	12,936.97	2.88	24,581.91
0.37	1,678.97	1.23	1,857.88	2.08	13,975.35	2.92	25,394.17
0.41	1,920.80	1.26	2,209.42	2.11	14,603.37	2.95	26,144.48
0.44	1,920.80	1.3	2,209.42	2.15	14,603.37	2.98	27,080.49
0.48	2,193.34	1.33	2,837.00	2.18	14,984.97	3.02	27,080.49
0.51	2,091.45	1.37	3,357.19	2.21	15,556.97	3.05	27,852.22
0.55	2,091.45	1.4	3,917.00	2.24	16,291.41	3.08	28,394.21
0.58	2,290.10	1.43	3,917.00	2.28	16,291.41	3.11	28,394.21
0.61	2,583.20	1.47	4,512.58	2.31	16,713.76	3.15	28,969.72
0.65	2,944.99	1.5	4,700.28	2.35	17,432.39	3.18	29,784.19
0.68	2,944.99	1.54	4,700.28	2.38	18,140.60	3.21	30,311.02
0.72	3,300.91	1.57	4,643.61	2.41	18,140.60	3.25	30,311.02
0.75	3,552.93	1.6	5,017.28	2.45	19,010.12	3.28	30,229.64
0.78	3,952.51	1.64	5,740.76	2.48	19,713.04	3.32	30,644.81

ตารางที่ ค.1 ผลทดสอบความต้านแรงอัด ปริมาณตะกอน 80% อุณหภูมิ 1100 °C

Stroke	Force	Stroke	Force	Stroke	Force
3.35	30,644.81	4.19	36,054.81	5.02	36,273.48
3.38	31,009.90	4.22	36,185.46	5.06	36,273.48
3.41	31,473.64	4.25	36,270.73	5.09	36,333.66
3.45	31,833.98	4.29	35,960.85	5.13	36,450.39
3.48	31,833.98	4.32	35,960.85	5.16	36,450.39
3.51	32,206.51	4.35	35,843.85	5.19	36,463.82
3.55	32,862.16	4.39	35,947.30	5.23	36,694.59
3.58	33,292.28	4.42	36,044.66	5.26	36,893.51
3.62	33,292.28	4.46	36,044.66	5.29	36,893.51
3.65	33,930.93	4.49	35,991.67	5.32	37,020.87
3.68	34,389.97	4.52	36,046.12	5.36	37,269.39
3.71	34,389.97	4.56	36,046.12	5.39	37,269.39
3.75	34,024.56	4.59	36,135.97	5.43	37,508.95
3.78	34,443.67	4.62	36,186.49	5.46	37,677.49
3.81	34,657.43	4.66	36,317.36	5.49	37,646.95
3.85	34,657.43	4.69	36,317.36	5.53	37,646.95
3.88	34,853.98	4.72	36,312.39	5.56	37,424.93
3.92	35,145.24	4.75	36,126.85	5.59	36,877.65
3.95	35,145.24	4.79	36,126.85	5.63	36,877.65
3.98	35,227.22	4.82	36,207.21	5.66	36,729.07
4.02	35,365.81	4.86	36,310.50	5.7	36,299.06
4.05	35,493.66	4.89	36,458.54		
4.08	35,493.66	4.92	36,458.54		
4.12	35,881.25	4.96	36,416.44		
4.15	36,054.81	4.99	36,390.16		

ภาคผนวก ง

คำอธิบายและคำย่อ

W คือ ความกว้างของอิฐ มีหน่วยเป็นเซนติเมตร

L คือ ความยาวของอิฐ มีหน่วยเป็นเซนติเมตร

H คือ ความสูงของอิฐ มีหน่วยเป็นเซนติเมตร

V คือ ปริมาตรของอิฐ มีหน่วยเป็นลูกบาศก์เซนติเมตร

Wt B คือ น้ำหนักของอิฐก่อนเผา มีหน่วยเป็นกรัม

Wt A คือ น้ำหนักของอิฐหลังเผา มีหน่วยเป็นกรัม

%Wt คือ เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักอิฐที่สูญสียไประหว่างเผา มีหน่วยเป็นกรัม

AVG %Wt คือ เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักอิฐที่สูญสียไประหว่างเผา มีหน่วยเป็นกรัม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ผลการทดสอบ

ตาราง ง.1 ผลการทดสอบค่าการสูญเสียน้ำหนัก (Weight Loss) ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส

%	W (cm.)	L (cm.)	H (cm.)	V (cm3)	Wt B (g)	Wt A (g)	%Wt	AVG %Wt
0.00	4.52	4.51	2.27	46.27	79.41	70.73	10.93	11.82
	4.50	4.50	2.30	46.58	79.32	69.24	12.71	
40.00	4.55	4.53	2.33	48.02	79.08	68.50	13.38	14.14
	4.53	4.54	2.32	47.71	78.97	67.20	14.90	
50.00	4.53	4.58	2.27	47.10	78.61	66.22	15.76	15.34
	4.53	4.55	2.31	47.61	78.86	67.10	14.91	
60.00	4.56	4.55	2.30	47.72	78.25	66.49	15.03	15.67
	4.57	4.52	2.26	46.68	78.85	65.99	16.31	
70.00	4.54	4.64	2.24	47.19	78.46	65.10	17.03	18.69
	4.54	4.64	2.25	47.40	78.65	62.65	20.34	
80.00	4.57	4.55	2.29	47.62	78.43	62.53	20.27	19.97
	4.48	4.52	2.32	46.98	78.32	62.92	19.66	

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตาราง ง.2 ผลการทดสอบค่าการสูญเสียน้ำหนัก (Weight Loss) ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส

%	W (cm.)	L (cm.)	H (cm.)	V (cm3)	Wt B (g)	Wt A (g)	%Wt	AVG %Wt
0.00	4.62	4.52	2.24	46.78	79.24	70.80	10.65	11.83
	4.76	4.53	2.21	47.65	79.56	69.21	13.01	
40.00	4.56	4.54	2.31	47.82	79.28	67.33	15.07	14.83
	4.55	4.51	2.33	47.81	78.97	67.45	14.59	
50.00	4.59	4.49	2.27	46.78	78.31	66.11	15.58	15.74
	4.52	4.56	2.31	47.61	78.76	66.23	15.91	
60.00	4.51	4.50	2.28	46.27	78.25	65.11	16.79	17.03
	4.50	4.55	2.30	47.09	78.85	65.23	17.27	
70.00	4.58	4.53	2.34	48.55	78.86	64.30	18.46	18.78
	4.57	4.56	2.25	46.89	78.75	63.71	19.10	
80.00	4.53	4.56	2.31	47.72	78.62	63.92	18.70	19.80
	4.54	4.47	2.29	46.47	78.72	62.27	20.90	

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตาราง ง.3 ผลการทดสอบค่าการสูญเสียน้ำหนัก (Weight Loss) ที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส

%	W (cm.)	L (cm.)	H (cm.)	V (cm3)	Wt B (g)	Wt A (g)	%Wt	AVG %Wt
0.00	4.58	4.47	2.33	47.70	79.89	69.44	13.08	12.87
	4.52	4.56	2.28	46.99	79.01	69.01	12.66	
40.00	4.58	4.49	2.32	47.71	79.54	66.91	15.88	16.02
	4.57	4.51	2.29	47.20	78.75	66.03	16.15	
50.00	4.56	4.49	2.28	46.68	78.78	65.28	17.14	17.26
	4.55	4.46	2.29	46.47	78.84	65.14	17.38	
60.00	4.54	4.53	2.31	47.51	78.52	65.04	17.17	17.37
	4.56	4.52	2.28	46.99	78.38	64.60	17.58	
70.00	4.55	4.49	2.29	46.78	77.66	63.43	18.32	18.93
	4.52	4.52	2.33	47.60	77.98	62.75	19.53	
80.00	4.55	4.46	2.29	46.47	77.76	61.83	20.49	20.93

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บรรณานุกรม

Alonso-Santurde, R., Coz, A., Viguri, J. R., & Andrés, A. (2012). Recycling of foundry by-products in the ceramic industry: Green and core sand in clay bricks. *Construction and Building Materials,* 27(1), 97-106. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.08.022

ASTM:C62-13a. (2013). Standard Specifification for Building Brick (Solid Masonry Units Made From Clay or Shale). In. Pennsylvania, United States.

Bories, C., Aouba, L., Vedrenne, E., & Vilarem, G. (2015). Fired clay bricks using agricultural biomass wastes: Study and characterization. *Construction and Building Materials,* 91, 158-163. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.05.006

Chen, Y., Zhang, Y., Chen, T., Zhao, Y., & Bao, S. (2011). Preparation of eco-friendly construction bricks from hematite tailings. *Construction and Building Materials,* 25(4), 2107-2111. doi:10.1016/j.conbuildmat.2010.11.025

Cheng, M.-H., & Rosentrater, K. A. (2017). Economic feasibility analysis of soybean oil production by hexane extraction. *Industrial Crops and Products,* 108, 775-785. doi:10.1016/j.indcrop.2017.07.036

De Silva, G. H. M. J. S., & Perera, B. V. A. (2018). Effect of waste rice husk ash (RHA) on structural, thermal and acoustic properties of fired clay bricks. *Journal of Building Engineering,* 18, 252-259. doi:10.1016/j.jobe.2018.03.019

Demir, I. (2006). An investigation on the production of construction brick with processed waste tea. *Building and Environment,* 41(9), 1274-1278. doi:10.1016/j.buildenv.2005.05.004

Demir, I., Serhat Baspınar, M., & Orhan, M. (2005). Utilization of kraft pulp production residues in clay brick production. *Building and Environment,* 40(11), 1533-1537. doi:10.1016/j.buildenv.2004.11.021

El-Mahllawy, M. S. (2008). Characteristics of acid resisting bricks made from quarry residues and waste steel slag. *Construction and Building Materials,* 22(8), 1887-1896. doi:10.1016/j.conbuildmat.2007.04.007

Espuelas, S., Omer, J., Marcelino, S., Echeverría, A. M., & Seco, A. (2017). Magnesium

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

oxide as alternative binder for unfired clay bricks manufacturing. *Applied Clay Science,* 146, 23-26. doi:10.1016/j.clay.2017.05.034

Gencel, O. (2015). Characteristics of fired clay bricks with pumice additive. *Energy and Buildings,* 102, 217-224. doi:10.1016/j.enbuild.2015.05.031

Halaby, A., Ghoneim, W., & Helal, A. (2017). Sensitivity analysis and comparative studies for energy sustainability in sewage treatment. *Sustainable Energy Technologies and Assessments,* 19, 42-50. doi:10.1016/j.seta.2016.11.004

J.W. Nowok, S. A. B., M.L. Jones. (1990). Sintering behaviour and strength development in various ashes. *Fuel* 69, 1020–1028.

Jan W. Nowok, S. A. B., Michael L. Jones and, & Kalmanovitch, D. P. (1990). Sintering behaviour and strength development in various coal ashes. *Fuel* 69, 1020-1028.

Leonzio, G. (2017). Design and feasibility analysis of a Power-to-Gas plant in Germany. *Journal of Cleaner Production,* 162, 609-623. doi:10.1016/j.jclepro.2017.05.168

Lin, K. L. (2006). Feasibility study of using brick made from municipal solid waste incinerator fly ash slag. *J Hazard Mater,* 137(3), 1810-1816. doi:10.1016/j.jhazmat.2006.05.027

Lingling, X., Wei, G., Tao, W., & Nanru, Y. (2005). Study on fired bricks with replacing clay by fly ash in high volume ratio. *Construction and Building Materials,* 19(3), 243-247. doi:10.1016/j.conbuildmat.2004.05.017

Martínez-Martínez, S., Pérez-Villarejo, L., Eliche-Quesada, D., Carrasco-Hurtado, B., Sánchez-Soto, P. J., & Angelopoulos, G. N. (2016). Ceramics from clays and by-product from biodiesel production: Processing, properties and microstructural characterization. *Applied Clay Science,* 121-122, 119-126. doi:10.1016/j.clay.2015.12.003

Menezes, R. R., Ferreira, H. S., Neves, G. A., Lira, H. d. L., & Ferreira, H. C. (2005). Use of granite sawing wastes in the production of ceramic bricks and tiles. *Journal of the European Ceramic Society,* 25(7), 1149-1158. doi:10.1016/j.jeurceramsoc.2004.04.020

Naganathan, S., Mohamed, A. Y. O., & Mustapha, K. N. (2015). Performance of bricks made using fly ash and bottom ash. *Construction and Building Materials,* 96, 576-580. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.08.068

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Sakhare, V. V., & Ralegaonkar, R. V. (2016). Use of bio-briquette ash for the development of bricks. *Journal of Cleaner Production,* 112, 684-689. doi:10.1016/j.jclepro.2015.07.088

Sankar, S., Sharma, S. K., Kaur, N., Lee, B., Kim, D. Y., Lee, S., & Jung, H. (2016). Biogenerated silica nanoparticles synthesized from sticky, red, and brown rice husk ashes by a chemical method. *Ceramics International,* 42(4), 4875-4885. doi:10.1016/j.ceramint.2015.11.172

Shakir, A. A., Naganathan, S., & Mustapha, K. N. (2013). Properties of bricks made using fly ash, quarry dust and billet scale. *Construction and Building Materials,* 41, 131-138. doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.11.077

Shih, P. H., Wu, Z. Z., & Chiang, H. L. (2004). Characteristics of bricks made from waste steel slag. *Waste Manag,* 24(10), 1043-1047. doi:10.1016/j.wasman.2004.08.006

Sutcu, M., & Akkurt, S. (2009). The use of recycled paper processing residues in making porous brick with reduced thermal conductivity. *Ceramics International,* 35(7), 2625-2631. doi:10.1016/j.ceramint.2009.02.027

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ณัฐวุฒิ ธงชัย
วัน เดือน ปี เกิด	30 มกราคม 2534
สถานที่เกิด	ชลบุรี
วุฒิการศึกษา	สำเร็จการศึกษามัธยมปลาย จากโรงเรียนชลราษฎรอำรุง จังหวัดชลบุรี สำเร็จการศึกษาปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ และได้เข้าศึกษาต่อปริญญาโท สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปี 2559
ผลงานตีพิมพ์	Rukijkanpanich, J., & Thongchai, N. (2019). Burned brick production from residues of quarrying process in Thailand. Journal of Building Engineering, 25. doi:10.1016/j.jobe.2019.100811 Thongchai, N. & Rukijkanpanich, J.(2019).Regression Method to Forecast the Parameter of Brick Burning Properties from Quarrying.ProcessGlobal Conference on Engineering and Applied Science;2019 July 16-18;Hokkaido,Japan,143-150.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University