อิฐมอญแบบไม่เผาที่มีส่วนผสมของซีโอไลท์เหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตไนโตรเจนเหลว

วิทยานิพนธ์

ของ

เสกสรรค์ นำสงค์

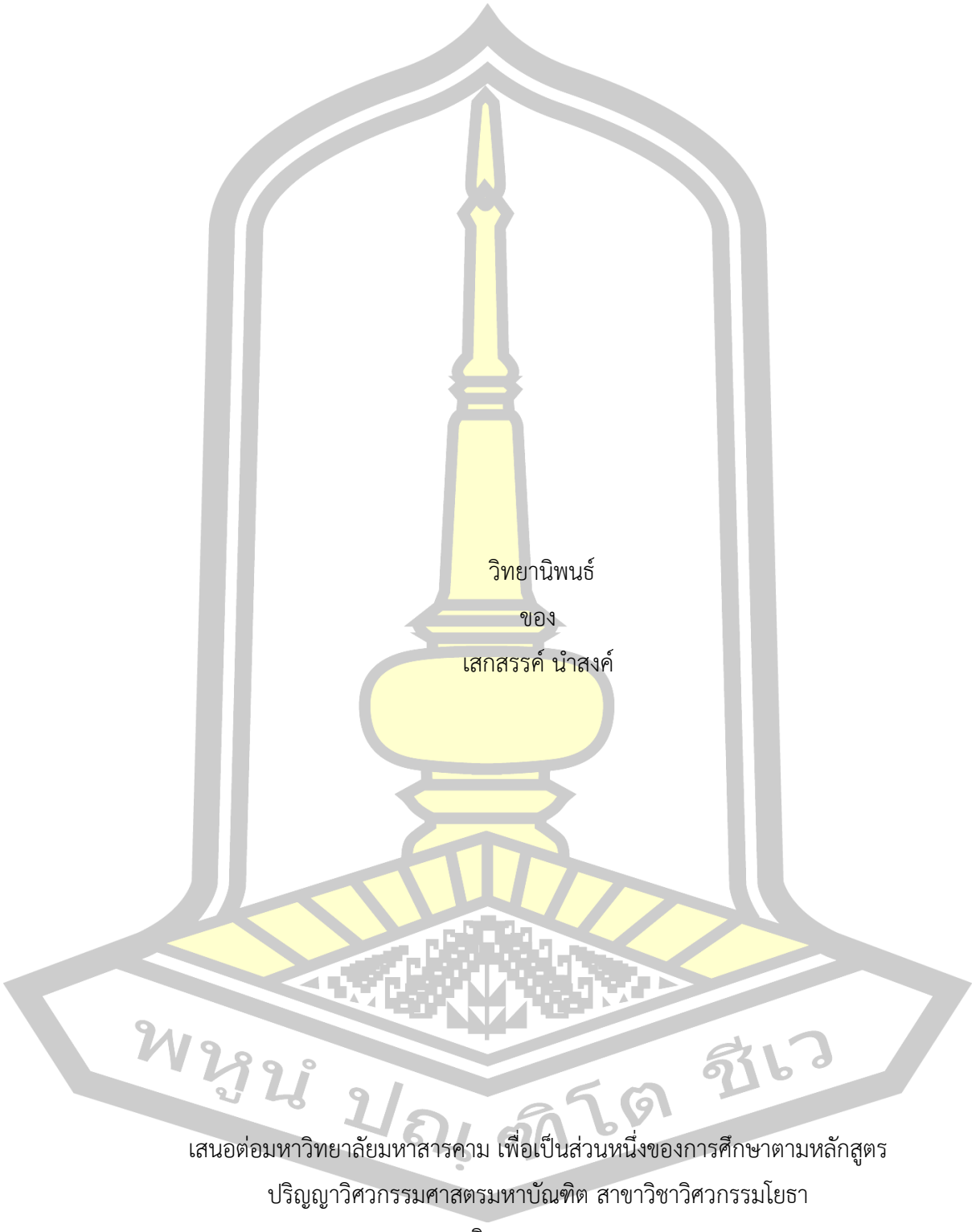
เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

มิถุนายน 2568

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

อิฐมอญแบบไม่เผาที่มีส่วนผสมของซีโอไลท์เหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตไนโตรเจนเหลว



วิทยานิพนธ์

ของ

เสกสรรค์ นำสงค์

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

มิถุนายน 2568

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

Unfired clay brick composite with residual zeolite from the production of liquid nitrogen

Seksan Numsong

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements

for Master of Engineering (Civil Engineering)

June 2025

Copyright of Mahasarakham University

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของนายเสกสรรค์ นำสงค์ แล้ว เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ผศ. ดร. ธีรวัฒน์ สินศิริ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผศ. ดร. นพปฎล เสงี่ยมศักดิ์)

.....กรรมการ
(รศ. ดร. สหลาภ หอมวุฒิวงศ์)

.....กรรมการ
(ผศ. ดร. ชัยชาญ โชติถนอม)

มหาวิทยาลัยอนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

.....
(รศ. ดร. จักรมาส เลาหวณิช)
คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

.....
(ผศ. ดร. พลเดช เชาวรัตน์)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

พหุน ปณฺฑิโต ชีวโร

ชื่อเรื่อง อิฐมอญแบบไม่เผาที่มีส่วนผสมของซีโอไลท์เหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตไนโตรเจนเหลว

ผู้วิจัย เสกสรรค์ นำสงค์

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ. ดร. นพปฎล เสงี่ยมศักดิ์

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต **สาขาวิชา** วิศวกรรมโยธา

มหาวิทยาลัย มหาวิทยาลัยมหาสารคาม **ปีที่พิมพ์** 2568

บทคัดย่อ

อิฐมอญเป็นวัสดุก่อผนังที่มีการใช้งานมาเป็นเวลานานและยังนิยมในปัจจุบัน การผลิตอิฐมอญต้องผ่านกระบวนการเผาเป็นระยะเวลา 7 ถึง 15 วัน ซึ่งก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศและอิฐมีคุณภาพไม่สม่ำเสมอ งานวิจัยนี้ทำการพัฒนาอิฐมอญที่ไม่ผ่านกระบวนการเผาที่มีการนำซีโอไลท์เหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตไนโตรเจนเหลว โดยใช้อัตราส่วนระหว่างปูนซีเมนต์ต่อดินลูกรังเท่ากับ 1:6 และใช้ซีโอไลท์แทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 0, 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 โดยน้ำหนัก อัดขึ้นรูปให้เป็นก้อนและบ่ม ทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุ 7 14 และ 28 วัน การดูดซึมน้ำ และโมดูลัสแตกร้าว ที่อายุ 28 วัน จากการทดสอบพบว่า การใช้ซีโอไลท์แทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 ถึง 40 ช่วยปรับปรุงกำลังรับแรงอัด โมดูลัสแตกร้าว และการดูดซึมน้ำให้ดีขึ้น ส่วนผสมที่แนะนำที่สามารถใช้ซีโอไลท์ได้มากที่สุดโดยที่ยังมีกำลังรับแรงอัดและการดูดซึมน้ำผ่านมาตรฐาน มอก.77-2565 ได้แก่ ส่วนผสมที่ใช้ซีโอไลท์แทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 (สำหรับอิฐชั้นคุณภาพ ข) และส่วนผสมใช้ซีโอไลท์แทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 60 (สำหรับอิฐชั้นคุณภาพ ค)

คำสำคัญ : อิฐมอญ, ซีโอไลท์, กำลังรับแรงอัด

พหุน ปณ ฑิโต ชีเว

TITLE Unfired clay brick composite with residual zeolite from the production of liquid nitrogen

AUTHOR Seksan Numsong

ADVISORS Assistant Professor Noppadol Sa-ngiamsak , Ph.D.

DEGREE Master of Engineering **MAJOR** Civil Engineering

UNIVERSITY Mahasarakham University **YEAR** 2025

ABSTRACT

Clay bricks have been used for centuries and continue to remain a popular building material today. The production of clay bricks involves 7 days to 15 days firing process, which not only contributes to air pollution but also results in inconsistent quality. This research developed non-fired clay bricks using zeolite waste from the liquid nitrogen production process. A mixture ratio of cement to lateritic soil of 1:6 was employed, with zeolite replacing cement at varying percentages of 0%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, and 60% by weight. The bricks were extruded into pellets, cured, and then tested for compressive strength at 7, 14, and 28 days, along with assessments of water absorption, rupture modulus, and thermal conductivity at 28 days. The results revealed that replacing 10% to 40% of cement with zeolite improved compressive strength, rupture modulus, and water absorption. Recommended ingredients that can use zeolite as much as possible while still having compressive strength and water absorption that pass TIS 77-2022 standards include ingredients that use zeolite in place of 20 percent cement (for bricks Quality class B) and the mixture uses zeolite in place of 60 percent cement (for quality class C bricks).

Keyword : Clay brick, Zeolite, Compressive strength

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นพปฎล เสงี่ยมศักดิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาหลักประจำสาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำอย่างใกล้ชิดตลอดระยะเวลาการศึกษาค้นคว้า ให้คำปรึกษาอย่างเป็นระบบ และมอบแนวคิดอันมีคุณค่าในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

ข้าพเจ้าขอขอบคุณ อาจารย์ผู้ทรงคุณวุฒิ และ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ทุกท่าน ที่ได้ให้เกียรติในการพิจารณาและเสนอแนะแนวทางปรับปรุงงานวิจัยให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม สำหรับสถานที่ เครื่องมือ และทรัพยากรต่าง ๆ ที่เอื้ออำนวยต่อการดำเนินงานวิจัย รวมทั้งเจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการที่ให้ความช่วยเหลือด้านการทดลองด้วยความเต็มใจ

ขอบพระคุณ เพื่อนร่วมชั้นเรียน และ เพื่อนร่วมวิจัย ที่คอยแลกเปลี่ยนความคิดเห็น ให้กำลังใจ และร่วมกันฝ่าฟันอุปสรรคต่าง ๆ ตลอดระยะเวลาการศึกษา

ท้ายที่สุดนี้ ข้าพเจ้าขอแสดงความขอบคุณจากใจต่อ ครอบครัว ผู้เป็นแรงผลักดันและแรงสนับสนุนสำคัญในทุกช่วงเวลาของชีวิต ทั้งในด้านกำลังใจ ความรัก และความเข้าใจอย่างไม่มีเงื่อนไข

ขออุทิศผลงานฉบับนี้ให้แก่ทุกท่านที่มีส่วนร่วมในการเรียนรู้และการเติบโตทางวิชาการของข้าพเจ้า

เสกสรรค์ นำสงค์

พหูน ปณฺฑิโต ชีเว

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญ ..... ช

สารบัญตาราง ..... ญ

สารบัญรูปภาพ ..... ฏ

บทที่ 1 1

บทนำ 1

1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย 1

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย 4

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย 4

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 5

1.4 แผนการศึกษา 5

บทที่ 2 6

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 6

2.1 อิฐมอญ 6

2.1.1 วัสดุส่วนผสมของอิฐมอญและอัตราส่วนผสม 7

2.1.2 ขั้นตอนการผลิตอิฐมอญ 8

2.1.3 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมของอิฐมอญ 11

2.2 อิฐบล็อกประสาน 14

2.2.1 วัสดุส่วนผสมที่ใช้ผลิตอิฐบล็อกประสาน 15

2.2.2 วิธีการผลิตอิฐบล็อกประสาน 18
2.2.3 มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนอิฐบล็อกประสาน 21
2.3 ซีโอไลท์ 22
2.4 การปรับปรุงดินโดยใช้ปูนซีเมนต์ 25
2.4.1 วิวัฒนาการของดินซีเมนต์ 25
2.4.2 กลไกการปรับปรุงคุณภาพของดินด้วยปูนซีเมนต์ 27
2.4.3 อัตราส่วนของปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมสำหรับดินแต่ละประเภท 29
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 31
บทที่ 3 36
วิธีการศึกษา 36
3.1 วัสดุและอัตราส่วนผสม 36
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ 37
3.3 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางเคมีของวัสดุ 38
3.4 ขั้นตอนการทำอิฐมอญแบบไม่เผา 39
3.5 การทดสอบอิฐมอญแบบไม่เผา 40
บทที่ 4 42
ผลทดลองและการวิเคราะห์ 42
4.1. ผลการทดสอบ XRF (X-ray Fluorescence) และการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี 42
4.2 ผลการทดสอบ XRD (X-ray Diffraction) และการวิเคราะห์โครงสร้างผลึก 43
4.3 การทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) 48
4.4 กำลังรับแรงอัด (Compression strength) 52
4.5 การดูดซึมน้ำ (Water absorption) 54
4.6 โมดูลัสแตกร้าว (Modulus of rupture) 56
4.7 การนำความร้อน (Thermal conductivity) 58

4.8 การเปรียบเทียบคุณสมบัติกับอิฐชนิดต่างๆ 59
4.8 การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ 60
บทที่ 5 64
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ 64
5.1 สรุปผลการวิจัย 64
5.2 ข้อเสนอแนะ 64
5.3 สรุป 65
บรรณานุกรม 67
ประวัติผู้เขียน 71

พหุน ปณ ฑิโต ชีเว

สารบัญตาราง

หน้า

ตาราง 1 แผนการศึกษา 5

ตาราง 2 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของขนาด อิฐมอญ 11

ตาราง 3 ค่ากำลังอัดของอิฐมอญ 12

ตาราง 4 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของขนาดอิฐกลวงก่อแผงไม่รับน้ำหนัก 13

ตาราง 5 ค่าการดูดกลืนน้ำของอิฐมอญ 13

ตาราง 6 เวลาทำการปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของสารประกอบหลัก สำเร็จร้อยละ 80 18

ตาราง 7 ค่ากำหนดการดูดกลืนน้ำของอิฐบล็อกประสานชนิดรับน้ำหนัก 21

ตาราง 8 ปริมาณปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมสำหรับดินแต่ละประเภท จำแนกตามระบบ Unified 29

ตาราง 9 ปริมาณปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมสำหรับดินแต่ละประเภท จำแนกตามระบบ AASHTO 29

ตาราง 10 ปริมาณปูนซีเมนต์โดยเฉลี่ยที่ใช้ผสม สำหรับวัสดุชนิดต่าง ๆ 30

ตาราง 11 อัตราส่วนผสม 37

ตาราง 12 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก ซีโอไลท์ ดินลูกรัง อิฐที่ผสมซีโอไลท์ และอิฐที่ไม่ผสมซีโอไลท์ จากการวิเคราะห์ด้วยวิธี X-ray fluorescence (XRF) 42

ตาราง 13 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก ซีโอไลท์ ดินลูกรัง อิฐที่ผสมซีโอไลท์ และอิฐที่ไม่ผสมซีโอไลท์ จากการวิเคราะห์ด้วยวิธี X-ray fluorescence (XRF) (ต่อ) 43

ตาราง 14 สรุปสารประกอบหลักที่พบในการทดสอบ XRD ของวัสดุ 47

ตาราง 15 สรุปสารประกอบหลักที่พบในการทดสอบ XRD ของวัสดุ (ต่อ) 48

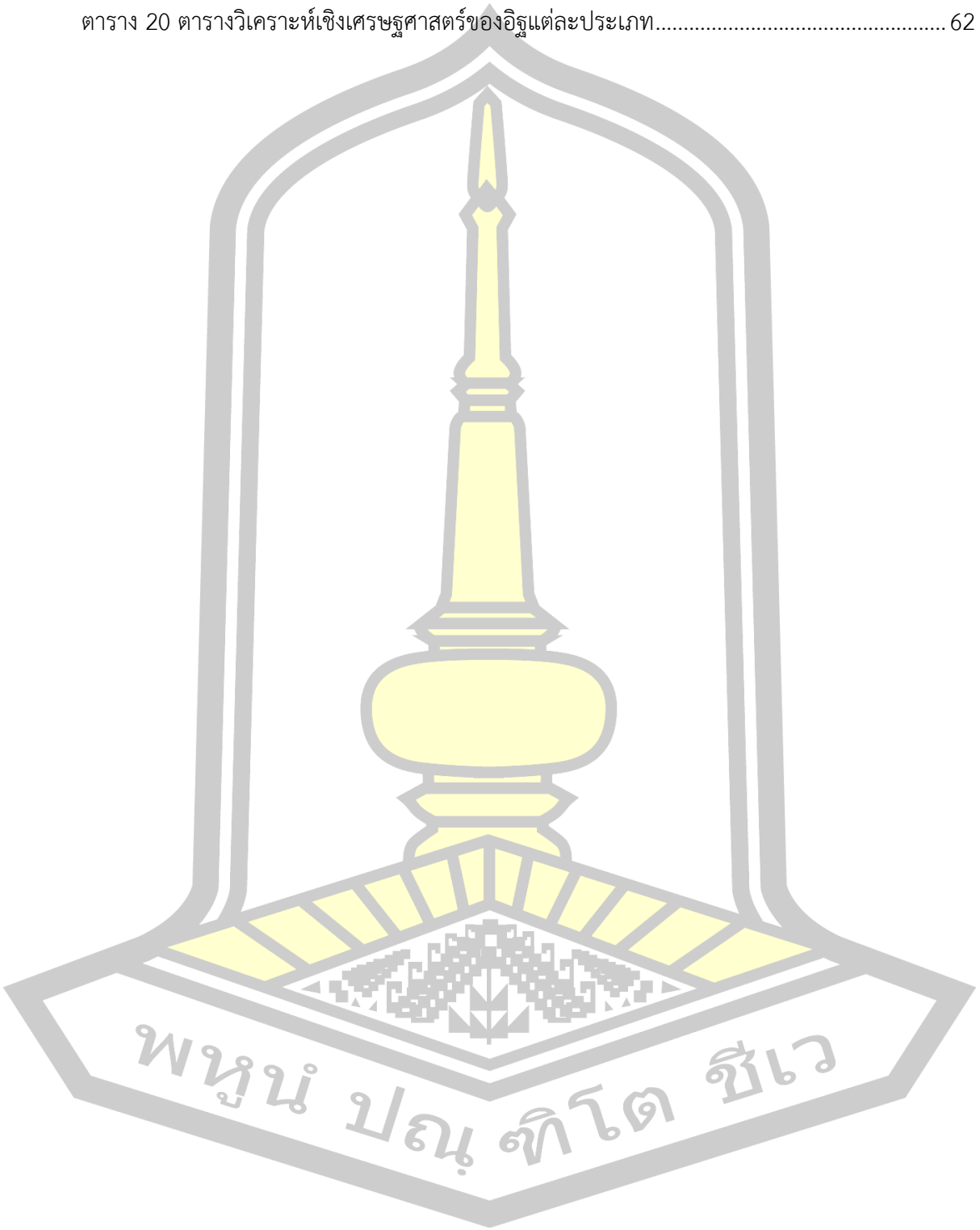
ตาราง 16 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของอิฐและเปรียบเทียบ มอก.77-2565 53

ตาราง 17 ผลการทดสอบการดูดซึมของอิฐมอญแบบไม่เผาที่ผสมซีโอไลท์และเปรียบเทียบ มอก.77-2565 55

ตาราง 18 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของอิฐมอญแบบไม่เผาผสมซีโอไลท์ของส่วนผสมที่แนะนำกับอิฐมอญดั้งเดิมที่ผ่านการเผา 59

ตาราง 19 การเปรียบเทียบราคาอิฐชนิดต่าง ๆ 61

ตาราง 20 ตารางวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์ของอิฐแต่ละประเภท 62



สารบัญรูปภาพ

หน้า

ภาพประกอบ 1 อิฐมอญทั้งแบบต่างๆ 6

ภาพประกอบ 2 ขั้นตอนการหมักดินเหนียวเพื่อผลิตอิฐมอญ 8

ภาพประกอบ 3 การย่ำดินเพื่อให้ดินมีเนื้อละเอียด 9

ภาพประกอบ 4 การนำส่วนผสมมาขึ้นรูปเป็นก้อนอิฐ 9

ภาพประกอบ 5 การตากอิฐดิบเพื่อไล่ความชื้นก่อนนำไปเผา 10

ภาพประกอบ 6 การเผาอิฐ 10

ภาพประกอบ 7 ลักษณะของอิฐบล็อกประสาน 14

ภาพประกอบ 8 การนำอิฐบล็อกประสานไปใช้งาน 14

ภาพประกอบ 9 ปฏิกิริยาของคัลเซียมซิลิเกต 17

ภาพประกอบ 10 การตีดินให้ละเอียด 19

ภาพประกอบ 11 การผสมดินกับปูนซีเมนต์และน้ำ 19

ภาพประกอบ 12 การอัดก้อนบล็อกประสาน 20

ภาพประกอบ 13 ก้อนอิฐบล็อกประสานที่ทำการอัดขึ้นรูปแล้ว 20

ภาพประกอบ 14 รูปแบบโครงสร้างของซีโอไลท์ 23

ภาพประกอบ 15 รูปแบบโครงสร้างของซีโอไลท์ 24

ภาพประกอบ 16 ดินลูกรังที่ใช้ในการผลิตอิฐประสาน 36

ภาพประกอบ 17 ซีโอไลท์ที่ผ่านการใช้งานในกระบวนการผลิตไนโตรเจนเหลว 37

ภาพประกอบ 18 เครื่องอัดขึ้นรูปอิฐมอญ 38

ภาพประกอบ 19 ลักษณะของก้อนอิฐที่อัดขึ้นรูป 39

ภาพประกอบ 20 การห่อก้อนอิฐด้วยพลาสติกเพื่อทำการบ่ม 40

ภาพประกอบ 21 แผนผังสรุปขั้นตอนการศึกษาวิจัย 41

ภาพประกอบ 22 ผลการทดสอบ XRD ของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก..... 45
ภาพประกอบ 23 ผลการทดสอบ XRD ซีโอไลท์..... 45
ภาพประกอบ 24 ผลการทดสอบ XRD ดินลูกรัง..... 46
ภาพประกอบ 25 ภาพถ่าย SEM ของซีโอไลท์..... 49
ภาพประกอบ 26 ภาพถ่าย SEM ของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก..... 50
ภาพประกอบ 27 ภาพถ่าย SEM ของดินลูกรัง..... 50
ภาพประกอบ 28 ภาพถ่าย SEM ของอิฐที่ผสมซีโอไลท์ร้อยละ 20..... 51
ภาพประกอบ 29 กำลังรับแรงอัดของอิฐมอญแบบไม่เผาผสมซีโอไลท์..... 52
ภาพประกอบ 30 การดูดซึมน้ำของอิฐมอญแบบไม่เผาผสมซีโอไลท์..... 54
ภาพประกอบ 31 โมดูลัสแตกร้าวของอิฐมอญแบบไม่เผาผสมซีโอไลท์..... 57
ภาพประกอบ 32 การนำความร้อนของอิฐมอญแบบไม่เผาผสมซีโอไลท์..... 58

พหุน ปณ ฑิโต ชีเว

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

อิฐมอญเป็นวัสดุก่อสร้างสำหรับก่อผนังที่ได้รับความนิยมมากที่สุดชนิดหนึ่งโดยขั้นตอนการผลิตคือ นำดินเหนียวผสมเถ้าแกลบหรือแกลบดิบ และน้ำ นำไปขึ้นรูปให้เป็นก้อนและนำไปเผาเป็นระยะเวลา 7-15 วัน จากการเผาอิฐมอญจะทำให้เกิดฝุ่นควัน และกลิ่น ส่งผลกระทบต่อชีวิตความเป็นอยู่ของประชาชนที่อาศัยอยู่บริเวณรอบๆ โรงงานผลิต จากวิธีการผลิตอิฐมอญดังกล่าวใช้ระยะเวลาในการผลิตจนถึงจำหน่ายใช้ระยะเวลาประมาณ 1 เดือน การเผาแต่ละครั้งต้องใช้เวลาประมาณ 15 วัน การเผาต้องเติมแกลบตลอด 24 ช.ม. ที่สำคัญกระบวนการเผาอิฐมอญยังทำให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมชุมชนที่อาศัยอยู่โดยรอบโรงงาน เกิดปัญหาสุขภาพเป็นโรคระบบทางเดินหายใจ สร้างความเดือนร้อนเป็นอย่างมาก รวมทั้งสร้างปัญหาภาวะโลกร้อนอีกด้วย ที่ผ่านมาได้มีแนวคิดในการผลิตอิฐมอญที่ไม่ผ่านการเผาเพื่อช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยณฐพงศ์ จันทร์เพ็ชร์ (2564) ได้นำดินลูกรังผสมกับปูนซีเมนต์และน้ำรวมถึงวัสดุอื่นๆ อีกเล็กน้อย ได้แก่ ฟางข้าว น้ำยางธรรมชาติ แล้วอัดขึ้นรูปเป็นก้อน ซึ่งพบว่าได้อิฐที่มีกำลังรับแรงอัดและการดูดซึมน้ำผ่านมาตรฐานมอก.77-2565 และยังมีขนาดก้อนที่ใกล้เคียงกัน รวมทั้งสามารถป้องกันความร้อนได้ดีกว่าอิฐมอญแบบเผา

ซีโอไลท์ เป็นสารประกอบอลูมิโนซิลิเกต มีพื้นที่ผิวสูงและมีรูพรุนขนาดเล็กซึ่งประกอบด้วยอะตอมของซิลิกา (Si) และอลูมิน่า (Al) ถูกนำไปใช้ในงานที่หลากหลายเนื่องจากมีคุณสมบัติทางเคมีที่เกิดขึ้นได้เองตามธรรมชาติหรือเกิดจากการสังเคราะห์ ปัจจุบันซีโอไลท์มีการนำมาใช้ในกระบวนการกรองน้ำโดยสามารถดูดซับสารตกตะกอน และสารประกอบที่ไม่ต้องการออกจากน้ำ ซึ่งจากงานวิจัยของประไพ อิสระ และคณะ (2452) พบว่าซีโอไลท์ธรรมชาติสามารถลดค่า บีโอดี ซีโอดี ไนโตรเจนทั้งหมด แอมโมเนียไนโตรเจน และฟอสฟอรัสทั้งหมดได้ร้อยละ 96.5, 93.4, 96.2, 99.8 และ 98.7 ตามลำดับ มีการนำซีโอไลท์ไปใช้ในกระบวนการกรองอากาศ เพื่อดูดซับสารตกตะกอนและกลิ่นหรือสารพิษจากอากาศ โดยงานวิจัยของภาวณี ตาลเถื่อน (2556) พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และไนโตรเจนเท่ากับร้อยละ 97.03±0.04 และ 53.76±0.01 ตามลำดับ และสามารถเพิ่มสัดส่วนของก๊าซมีเทนได้ถึงร้อยละ 87.87±0.01 การใช้ในอุตสาหกรรมแปรรูปน้ำมันเพื่อดูดซับสารตกตะกอนและสารประกอบที่ไม่ต้องการ จำรัส ลิ้มตระกูล และคณะ (2537) ได้ศึกษาความสามารถในการดูดซับแอมโมเนียของวัสดุจำพวกซิลิกา ซีโอไลต์ และซีโอไลต์ดัดแปลง โดยใช้วิธีการวิเคราะห์เชิงโครงสร้างและพลังงานผ่านการคำนวณทางเคมีควอนตัม (SCF calculation) เพื่อ

ประเมินกลไกการดูดซับและพลังงานที่เกี่ยวข้อง พบว่าซีโอไลต์และซีโอไลต์ดัดแปลงมีความสามารถในการดูดซับแอมโมเนียได้ดี โดยเกิดการยึดเหนี่ยวผ่านพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลแอมโมเนียและกลุ่มไฮดรอกซิล (–OH) บนโครงสร้างของวัสดุ นอกจากนี้ยังพบว่า การดัดแปลงโครงสร้างซีโอไลต์ด้วยธาตุเจอร์เมเนียม (Ge) และแกลเลียม (Ga) ส่งผลให้พลังงานการดูดซับเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วงติดลบ 12.20 ถึง 12.80 กิโลแคลอรีต่อโมล ซึ่งเป็นค่าที่สะท้อนถึงแรงยึดเหนี่ยวที่เหมาะสมระหว่างวัสดุกับไอออนแอมโมเนีย ทั้งนี้ กลไกดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงศักยภาพของซีโอไลต์และวัสดุดัดแปลงในการนำไปประยุกต์ใช้ด้านการบำบัดมลพิษหรือเป็นตัวกลางในกระบวนการดูดซับทางสิ่งแวดล้อมได้อย่างมีประสิทธิภาพ ผลการวิจัยของ พัทธนันท์ นาถพินิจ และชลธิชา นิวาสประกฤติ (2565) พบว่าค่าความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของซีโอไลท์ 4เอ มีค่ามากที่สุดเป็น 786 เซนติโมลต่อกิโลกรัม พฤติกรรมการดูดซับแอมโมเนียมและโพแทสเซียมในซีโอไลท์ 4เอ เป็นไปตามแบบจำลองฟรุนด์ลิช ซึ่งมีศักยภาพในการดูดซับเป็น 20.39 มิลลิกรัม แอมโมเนียมต่อกรัมซีโอไลต์และที่ 17.48 มิลลิกรัม โพแทสเซียมต่อกรัมซีโอไลต์ที่สัดส่วนร้อยละของแข็ง ที่ร้อยละ 0.5 ระดับค่า PH และระยะเวลาไม่มีผลต่อการดูดซับ แต่ความเข้มข้นเริ่มต้นมีผลต่อในการดูดซับแร่ธาตุ รูปแบบการดูดซับแร่ธาตุของซีโอไลท์ 4เอ มีขั้นตอนการดูดซับ 2 รอบ เพื่อให้มีประสิทธิภาพในการดูดซับสูงสุด โดยรอบที่ 1 ความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 0.02 โมลาร์ ใช้ตัวดูดซับที่ร้อยละของแข็ง ที่ร้อยละ 0.5 รอบที่ 2 ที่ร้อยละของแข็ง ที่ร้อยละ 0.25 ในสารละลายเดิม จะได้ร้อยละการดูดซับแอมโมเนียมและโพแทสเซียมเป็น 71.76 และ 61.11 ตามลำดับ และมีสัดส่วนการดูดซับแร่ธาตุต่อซีโอไลต์เป็น 26.68 มิลลิกรัม แอมโมเนียมต่อกรัมซีโอไลต์ และ 28.91 มิลลิกรัม โพแทสเซียมต่อกรัมซีโอไลท์ และจากการทดสอบการละลายของปุ๋ยพบว่า ปุ๋ยซีโอไลต์ 4เอ+แอมโมเนียม และ 4เอ+โพแทสเซียม มีอัตราการละลายคงที่ 0.157 กรัมแอมโมเนียมต่อลิตร และ 0.129 กรัมโพแทสเซียมต่อลิตร ซึ่งจัดว่าเป็นปุ๋ยละลายช้าที่สามารถควบคุมการปลดปล่อยของแร่ธาตุได้ และยังมีการนำซีโอไลท์ไปใช้ในอุตสาหกรรมอาหารซึ่งสามารถใช้ในกระบวนการกรองสารพิษจากอาหารหรือของปรุงแต่งเพื่อปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ มากไปกว่านั้นซีโอไลท์ยังสามารถใช้ในงานก่อสร้างบางประการสามารถใช้เป็นวัสดุก่อสร้างเช่น ในการผลิตคอนกรีตหรือวัสดุภายในสถาปัตยกรรม ทวีชัย สำราญวานิช (2561) การใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนวัสดุประสานร้อยละ 3 ทำให้คอนกรีตมีความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตมีค่าสูงสุดเมื่อเทียบกับการใช้ซีโอไลท์แทนวัสดุประสานในอัตราส่วนร้อยละ 1, 5,และร้อยละ 10 และการใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนวัสดุประสานในคอนกรีตมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงช่วยปรับปรุงความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตได้ดีกว่าที่อัตราน้ำต่อวัสดุประสานต่ำ

จะเห็นได้ว่าซีโอไลท์เป็นแร่ที่มีโครงสร้างที่มีช่องโมเลกุล ซึ่งทำให้มีความสามารถในการดูดซับและแลกเปลี่ยนไอออนได้ ในอุตสาหกรรมผลิตไนโตรเจนเหลว (Liquid nitrogen production) ซีโอไลท์มักถูกนำมาใช้ในกระบวนการที่เรียกว่า "Pressure swing adsorption (PSA)" หรือ

"Temperature swing adsorption (TSA)" เพื่อทำให้ไอออนที่ต้องการถูกดึงออกจากสารผลึก อุตสาหกรรมผลิตไนโตรเจนเหลวหรือการผลิตไนโตรเจนเหลว (Liquid nitrogen) เป็นกระบวนการที่ใช้เทคโนโลยีทางเคมีและวิศวกรรม เพื่อทำให้ไอออนที่มีอยู่ในอากาศถูกแยกออกจากส่วนอื่น ๆ ของอากาศ ทำให้ได้ผลิตไนโตรเจนเหลวที่มีความบริสุทธิ์สูง การใช้ซีโอไลท์ในกระบวนการผลิตไนโตรเจนเหลวมักเกี่ยวข้องกับการใช้ในกระบวนการดูดซับ (Adsorption) โดยซีโอไลท์จะช่วยในการแยกไอออนที่ต้องการจากสารผลึกหรืออื่น ๆ ในกระบวนการ PSA หรือ TSA เพื่อผลิตไนโตรเจนเหลวที่สะอาดและมีคุณภาพสูงในกระบวนการผลิตไนโตรเจนเหลวจะมีการใช้ซีโอไลท์เพื่อดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซีโอไลท์ที่ผ่านการใช้งานแล้วจะกลายเป็นวัสดุเหลือทิ้งที่รอการกำจัดต่อไป ซึ่งมีปริมาณปีละหลายตันและมีค่าใช้จ่ายสูงในการกำจัด

ที่ผ่านมา มีการนำซีโอไลท์ไปใช้ประโยชน์ในการปรับปรุงคุณสมบัติของดินทางด้านวิศวกรรม โดย Mohammadraza (2021) ได้ใช้ซีโอไลท์เติมลงในดินที่ได้รับการปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ (Cement-stabilized soil) พบว่าดินที่ผสมทั้งซีโอไลท์และปูนซีเมนต์ มีกำลังรับน้ำหนักมากกว่าดินที่ผสมซีโอไลท์หรือปูนซีเมนต์เพียงอย่างใดอย่างหนึ่ง ทำให้เห็นว่า ซีโอไลท์สามารถช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของดินที่ผสมปูนซีเมนต์ได้ ปัจจุบันการใช้ซีโอไลท์ในคอนกรีตมีความหลากหลายในการนำมาปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุดังนี้ ลดการอมน้ำ (Water retention) เมื่อซีโอไลท์ถูกเพิ่มลงในคอนกรีตได้ช่วยลดการถูกดูดซับน้ำและช่วยควบคุมการอมน้ำในวัสดุ เป็นประโยชน์สำหรับการลดการบิดโค้งของคอนกรีตและป้องกันความเสียหายที่เกิดจากอมน้ำ อีกอย่างช่วยการควบคุมอุณหภูมิ (Temperature control) โดย ซีโอไลท์มีความสามารถในการดูดซับและปล่อยไอน้ำตามเงื่อนไขทางอุณหภูมิ ซึ่งสามารถช่วยลดการสะสมของความร้อนในคอนกรีต และทำให้มีประสิทธิภาพในการควบคุมอุณหภูมิในสภาพแวดล้อม อีกทั้งการระบายความร้อน (Cooling effect) เมื่อซีโอไลท์สัมผัสกับน้ำจะสามารถทำให้มีการระบายความร้อนซึ่งสามารถเป็นประโยชน์ในการลดอุณหภูมิของคอนกรีตในสภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิสูง การดูดซับกลิ่น (Odor adsorption) โดยซีโอไลท์มีความสามารถในการดูดซับกลิ่น ทำให้มีประสิทธิภาพในการควบคุมกลิ่นที่เกิดขึ้นในคอนกรีต การเพิ่มความแข็งแกร่ง (Strength enhancement) จากร่างงานวิจัยชี้ให้เห็นว่าการเพิ่มซีโอไลท์ลงในคอนกรีตสามารถเพิ่มความแข็งแกร่งของวัสดุได้

งานวิจัยนี้มีแนวคิดที่จะผลิตอิฐมอญแบบไม่ต้องเผาที่มีส่วนผสมของซีโอไลท์เหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตไนโตรเจนเหลว เพื่อเป็นการนำวัสดุเหลือทิ้งมาใช้ประโยชน์หรือการรีไซเคิล (Recycling) อันเป็นผลดีต่อสิ่งแวดล้อมและสามารถลดปริมาณซีโอไลท์เหลือทิ้งได้ โดยผสมปูนซีเมนต์ ดินลูกรัง ซีโอไลท์ และน้ำ ในอัตราส่วนที่แตกต่างกันแล้วทำการอัดขึ้นรูปให้เป็นก้อนและนำไปทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ได้แก่ กำลังรับแรงอัด การดูดซึมน้ำ การนำความร้อน การหดตัว รวมทั้งศึกษาถึงโครงสร้างทางเคมีของอิฐมอญผสมซีโอไลท์ที่ผลิตขึ้น ทั้งนี้ เพื่อเป็นแนวทางการผลิตอิฐมอญ

ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและนำซีโอไลท์เหลือทิ้งมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด รวมทั้งตอบโจทย์แนวคิดทางเศรษฐศาสตร์ที่มุ่งเน้นการลดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติและปริมาณขยะที่เกิดขึ้น โดยการนำวัสดุที่ใช้งานแล้วกลับมาใช้ประโยชน์ซ้ำได้มากที่สุด อันเป็นการช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและลดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติเพื่อความยั่งยืนทั้งทางเศรษฐกิจและสิ่งแวดล้อมได้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมและทางเคมีของอิฐมอญแบบไม่เผาที่ผสมซีโอไลท์เหลือทิ้ง
- เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของอิฐมอญแบบไม่เผาที่ผสมซีโอไลท์เหลือทิ้ง

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการพัฒนาอิฐมอญแบบไม่เผาที่ผสมซีโอไลท์ เหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตไนโตรเจนเหลว วัสดุที่ใช้เป็นส่วนผสมประกอบด้วยปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก ดินลูกรัง ซีโอไลท์ และน้ำ โดยมีอัตราส่วนของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก : ดินลูกรัง : ซีโอไลท์ ที่แตกต่างกัน 7 อัตราส่วน ได้แก่ 1:6:0, 0.9:6:0.1, 0.8:6:0.2, 0.7:6:0.3, 0.6:6:0.4, 0.5:6:0.5 และ 0.4:6:0.6 ใช้น้ำในปริมาณที่พอดีต่อการอัดขึ้นรูป ทำการผสมวัสดุทั้งหมดให้เข้ากันและอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดแบบมือโยกให้มีขนาด 65 มม. x 140 มม. x 40 มม. ซึ่งเป็นขนาดมาตรฐานของอิฐมอญที่กำหนดไว้ใน มอก.77-2545 พักไว้ในที่ร่ม 24 ชั่วโมงแล้วทำการบ่มด้วยการฉีดพรมน้ำและหุ้มด้วยพลาสติกจนถึงอายุทดสอบ การทดสอบคุณสมบัติประกอบด้วย

- คุณสมบัติพื้นฐานของดินลูกรัง ได้แก่ การกระจายขนาด ความถ่วงจำเพาะ พิกัดอัตเตอร์เบอร์ก
- คุณสมบัติทางวิศวกรรมของอิฐมอญแบบไม่เผาที่ผสมซีโอไลท์ ได้แก่
- กำลังรับแรงอัดที่อายุ 7 14 และ 28 วัน
- โมดูลัสแตกหักที่อายุ 28 วัน
- การดูดซึมน้ำที่อายุ 28 วัน
- การนำความร้อนที่อายุ 28 วัน
- การหดตัวที่อายุ 28 วัน
- คุณสมบัติทางเคมีของอิฐมอญแบบไม่เผาที่ผสมซีโอไลท์ ได้แก่
- X-Ray Diffractometer (XRD)) เทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์อาศัยหลักการของการยิงรังสีเอ็กซ์ไปกระทบที่ชิ้นงาน ใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างของผลึกของสารตัวอย่างนั้นๆได้นอกจากนั้นแล้วยังสามารถศึกษาและวิเคราะห์ ปริมาณความเป็นผลึก ขนาดของผลึก ความสมบูรณ์ของผลึก และความเค้นของสารประกอบในสารตัวอย่าง

- Scanning electron microscopy (SEM) หรือ เทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดศึกษาวัสดุโดยใช้การกวาดลำอิเล็กตรอนบนผิววัสดุนั้น แล้วนำสัญญาณที่ได้ เช่น สัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิและสัญญาณอิเล็กตรอนกระเจิงกลับไปสร้างเป็นภาพ ภาพที่ได้จากกล้อง SEM เป็นภาพที่กำลังขยายสูง และสามารถแยกแยะรายละเอียดของภาพได้ถึง 100 นาโนเมตร และมีลักษณะเสมือน 3 มิติที่มีระยะชัดลึกสูง ทำให้สามารถระบุลักษณะของพื้นผิวของชิ้นงานได้อย่างชัดเจน
- X-ray fluorescence (XRF) เป็นวิธีการที่ใช้รังสีเอกซ์พลังงานต่ำเพื่อกำหนดองค์ประกอบทางเคมีของโลหะผสม
- การทดลองนำไปก่อผนังและฉาบปูน เพื่อดูการยึดเกาะของปูนฉาบ
- นำกำลังรับแรงอัดและการดูดซึมน้ำของแต่ละส่วนผสมไปเปรียบเทียบกับเกณฑ์ที่กำหนดใน มอก.77-2545 เพื่อหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสม

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ทำให้ทราบถึงความเป็นไปได้ในการนำซีโอไลท์ที่เหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตไนโตรเจนเหลวมาใช้เป็นส่วนผสมในอิฐมอญแบบไม่เผา และทราบถึงส่วนผสมที่เหมาะสมที่สามารถนำไปใช้ในการผลิตในเชิงพาณิชย์ต่อไปได้

1.4 แผนการศึกษา

ตาราง 1 แผนการศึกษา

แผนการศึกษา	
ตุลาคม 2566 – กุมภาพันธ์2567	ศึกษาหาข้อมูล
มีนาคม 2567 - เมษายน 2567	เตรียมวัสดุ
พฤษภาคม 2567 - กรกฎาคม 2567	อัดก้อนตัวอย่าง
สิงหาคม 2567 – กันยายน 2567	ทดสอบก้อนตัวอย่าง
ตุลาคม 2567	ขึ้นสอบ

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื่องจากอิฐมอญแบบไม่เผาที่ผสมซีโอไลท์ที่จะศึกษาในงานวิจัยนี้ ใช้วิธีการผลิตโดยการอัดขึ้นรูปส่วนผสมเช่นเดียวกับอิฐประสาน โดยใช้ดินผสมปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกและซีโอไลท์ ดังนั้น ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวกับอิฐมอญ อิฐประสาน ซีโอไลท์ การปรับปรุงดินโดยผสมกับปูนซีเมนต์ รวมทั้งงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.1 อิฐมอญ

อิฐมอญ หรือ อิฐก่อสร้างสามัญ มีส่วนประกอบมาจากดินเหนียวปนทรายเล็กน้อยมาหมักรวมกับขี้เถ้าแกลบจากการเผาแรกเริ่มมีลักษณะตัน เนื่องจากในสมัยก่อนจะยังไม่มีอุปกรณ์เครื่องมือในการช่วยผลิต จึงทำด้วยมือทีละก้อนๆ ต้นกำเนิดมาจากชาวมอญที่อพยพมาตั้งถิ่นฐานที่ประเทศไทยและได้ทำเครื่องปั้นดินเผาต่าง ๆ เช่นภาชนะอย่าง หม้อ ไห ของใช้ในครัวเรือน รวมถึงการทำอิฐเพื่อก่อสร้างอาคาร บ้านเรือน วัด ซึ่งได้รับความนิยมในเวลาต่อมาจนถึงปัจจุบัน เนื่องจากเป็นอิฐที่มีความแข็งแรงและทนทาน

ในปัจจุบันได้มีการมีการนำเทคโนโลยีมาพัฒนาในการผลิตอิฐมอญให้มีรูปแบบที่หลากหลายมากขึ้น โดยมีทั้งแบบตันและแบบกลวง ซึ่งอิฐมอญแบบตันจะมีลักษณะคล้ายอิฐโบราณ แต่ขนาดเล็กกว่า ส่วนอิฐมอญแบบกลวง จะมีรูตั้งแต่ 2 ถึง 4 รู ไปจนถึงสูงสุด 8 รู ที่รองรับการใช้งานแบบหลากหลาย ดังภาพประกอบ 1

ภาพประกอบ 1 อิฐมอญทั้งแบบต่างๆ(ที่มา: https://www.itdangasia.com)

2.1.1 วัสดุส่วนผสมของอิฐมอญและอัตราส่วนผสม

วัสดุส่วนผสมในการผลิตอิฐมอญประกอบด้วย ดินเหนียว ทราย แกลบดิบ เถ้าแกลบ น้ำ หรืออาจมีวัสดุอื่นๆ ผสมเพิ่มเติมเล็กน้อยตามสูตรของโรงงานผลิตแต่ละที่ ในที่นี้ จะกล่าวถึงรายละเอียดของวัสดุหลักเท่านั้น ได้แก่ ดินเหนียว ทราย แกลบดิบ และเถ้าแกลบ

1) ดินเหนียว คุณสมบัติด้านวิศวกรรมของดินมีความสำคัญต่อการผลิตอิฐในเรื่องการผสม การขึ้นรูป การเผา การรับแรงอัด และการดูดซึมน้ำ ดินที่ใช้จะต้องเป็นดินเหนียวที่มีทรายปนอยู่บ้างในอัตราส่วนที่เหมาะสมไม่มากจนเกินไป และจะต้องไม่มีกรวดปน

ดินเหนียวมีคุณสมบัติช่วยให้เม็ดดินเกาะกันเป็นก้อน และขึ้นรูปได้ง่าย ในระหว่างที่ยังเผาไม่สุกแต่ดินที่มีดินเหนียวปนมากเกินไปจะหดตัวมากจะทำให้เกิดการแตกร้าวได้เมื่อผึ่งให้แห้งและจะบิดตัวมากเมื่อเผาสุก วิธีแก้ไขคือจะต้องผสมทรายเพิ่มเพื่อลดการหดตัวและบิดตัว

ดินที่มีกรวดปนเมื่อนำไปเผา กรวดจะแปรสภาพเป็นปูนขาวฝังอยู่ในเนื้ออิฐ ปูนขาวจะดูดน้ำมากและทำให้อิฐแตกง่าย โดยทั่วไปดินที่จะนำมาใช้ควรเป็นดินที่ขุดลึกลงไปประมาณ 1 ถึง 1.5 เมตร การที่จะนำผิวดินมาใช้จะต้องทำการผสม และนวดดินจนมีความเหนียวมากพอที่จะขึ้นรูปอิฐได้ โดยดินที่จะนำมาใช้นั้นควรประกอบด้วยดินเหนียวร้อยละ 60 ดินทรายร้อยละ 20 และแร่ธาตุอื่นๆ เช่น หินปูนและเหล็กออกไซด์ (ร้อยละ 20) วิธีการตรวจสอบดินที่จะนำมาใช้ในการทำอิฐนั้นสามารถทดสอบง่ายๆ โดยการนำดินมาปั้นเป็นก้อนแล้วผึ่งลมหรือตัดให้แห้ง ถ้าก้อนดินมีการหดตัวหรือแตกร้าวมากหมายความว่าดินนั้นมีส่วนผสมของดินเหนียวมากเกินไป ถ้าก้อนดินยุ่ยหรือเปราะหมายความว่ามีดินทรายปนมากเกินไป

2) ทราย เป็นวัสดุของเศษหิน เศษแร่ขนาดเล็กมีลักษณะร่วนซุยไม่เกาะกัน เกิดจากกระบวนการผุพังสลายตัวทางธรรมชาติทั้งจากปฏิกิริยาทางเคมีและทางกายภาพของหินที่เป็นต้นกำเนิด เช่นหินอัคนี, หินตะกอนหรือหินชั้น, และหินแปร ซึ่งทรายจะประกอบด้วยธาตุซิลิกอน (Silicon) และออกซิเจน (Oxygen) โดยมีชื่อทางเคมีว่า ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO2) หรือเรียกว่าซิลิกา (Silica) โดยทั่วไปเม็ดทรายจะมีขนาด 0.06 ถึง 2.00 มิลลิเมตร โดยการผสมในอิฐนั้นเพื่อเพิ่มสมบัติการป้องกันการแตกร้าวและการหดตัวของอิฐ แต่ถ้าใช้ดินที่มีทรายปนมากเกินไป อิฐจะเปราะและแตกได้

3) แกลบดิบ อิฐมอญส่วนมากจะมีส่วนผสมของแกลบดิบอยู่ด้วย การใช้แกลบผสมในเนื้อดินเนื่องจากเมื่อเผาอิฐให้สุกแล้วแกลบในเนื้อดินจะไหม้ไฟทำให้เกิดรูพรุนในก้อนอิฐ อิฐจะมีน้ำหนักเบาและดูดซับน้ำและปูนได้ดีทำให้ก่ออิฐได้ดี ปริมาณแกลบที่ใช้ผสมจะแตกต่างกันในแต่ละพื้นที่ขึ้นอยู่คุณภาพของดินเป็นหลัก อิฐมอญโดยทั่วไปมักจะใช้แกลบผสมประมาณ 100 ลิตร ต่ออิฐ 1000 ก้อน (ที่มา: https://www.cpacacademy.com/)

4) เถ้าแกลบ เถ้าแกลบที่นำมาใช้ในการผสมอิฐ จะต้องผ่านการเผาแล้วเป็นผงเล็ก ๆ มีสีเทาไม่มีสิ่งเจือปน โดยจะผสมเถ้าแกลบไปกับดินเพื่อให้เกิดความยืดหยุ่นของตัวอิฐเวลาเผาอิฐจะได้สุกดีและมีความยืดหยุ่นเวลาใช้งาน ขี้เถ้าแกลบที่นำมาใช้ในการทำอิฐ จะต้องทำการคัดแยกเศษไม้หรือวัสดุอื่น ๆ ที่ปนมาออกให้หมด เพราะหากมีวัสดุที่ไม่ใช่เถ้าแกลบ ปนมากับเถ้าแกลบเวลาเอามาผสมทำอิฐจะทำให้อิฐเกิดความเสียหาย เช่น อิฐแตก อิฐหัก หรือบางทีเศษวัสดุนั้นเข้าไปติดกับเครื่องจักรทำให้เครื่องจักรเกิดความเสียหายได้

5) น้ำ น้ำอาจไม่ใช่วัตถุดิบหลัก เพราะในดินเหนียวจะมีน้ำอยู่แล้ว แต่ก็ถือว่าเป็นวัตถุดิบที่สำคัญ มีหน้าที่เป็นส่วนผสมเพื่อปรับสภาพของดินเหนียวให้มีความเหนียวที่เหมาะสมกับการผลิตอิฐมอญ เพราะหากดินเหนียวมีความเหนียวมากเกินไปจะทำให้เป็นอุปสรรคต่อการขึ้นรูป เมื่อนำเข้าเครื่องดินอาจจะไปติดเครื่องได้ แล้วอิฐจะออกมาไม่สมบูรณ์ได้ นอกจากนี้ความเหนียวจนเกินไปจะทำให้อิฐดิบหดตัวในขณะเผา และแตกหัก เสียรูปได้

2.1.2 ขั้นตอนการผลิตอิฐมอญ

1) เตรียมดิน โดยการนำดินเหนียวมาหมักรวมกับขี้เถ้าแกลบและน้ำในบ่อหมัก ทิ้งไว้ประมาณ 1 ถึง 2 คืน เพื่อรอการรีดขึ้นรูป ดังภาพประกอบ 2

ภาพประกอบ 2 ขั้นตอนการหมักดินเหนียวเพื่อผลิตอิฐมอญ
(ที่มา : https://brickdd.com)

2) นำดินที่ได้ไปปั่นในเครื่องปั่นให้ดินเป็นเนื้อละเอียดหรือย่ำดินเหนียวด้วยเท้า เพื่อให้ส่วนผสมในเนื้อดินเข้ากันเป็นเนื้อเดียวกัน อิฐที่ได้จะมีความหนาแน่น และเรียบเนียนดี ดังภาพประกอบ 3

ภาพประกอบ 3 การย่ำดินเพื่อให้ดินมีเนื้อละเอียด
(ที่มา: https://brickdd.com)

3) นำส่วนผสมมาขึ้นรูปโดยใช้เครื่องรีดเป็นเส้นแล้วใช้ลวดตัดให้เป็นก้อน ซึ่งใช้สำหรับการผลิตอิฐชนิดกลวง และอิฐตันเครื่อง ดังภาพประกอบ 4

ภาพประกอบ 4 การนำส่วนผสมมาขึ้นรูปเป็นก้อนอิฐ
(ที่มา: https://brickdd.com)

4) นำอิฐดิบที่รีดขึ้นรูปเรียบร้อยแล้วไปผึ่งลมในที่ร่มประมาณ 3 ถึง 4 วัน เพื่อป้องกันการหดตัวของอิฐอย่างรวดเร็วจนทำให้เกิดการแตกหัก หลังจากนั้นจึงนำไปตากแดดต่ออีกประมาณ 3 ถึง 4

วัน หรืออาจนานกว่านั้นขึ้นอยู่กับการพิจารณาของผู้ผลิตว่าอิฐดิบมีความพร้อมที่จะนำไปเผาแล้วหรือไม่ ดังภาพประกอบ 5

ภาพประกอบ 5 การตากอิฐดิบเพื่อไล่ความชื้นก่อนนำไปเผา
(ที่มา: https://brickdd.com)

5) นำอิฐดิบที่ตากแห้งเรียบร้อยแล้วไปเผาที่อุณหภูมิ 800 ถึง 900 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลาประมาณ 7 ถึง 15 วัน โดยผู้ผลิตนิยมเผาอิฐมอญครั้งละมาก ๆ ประมาณ 70,000 ถึง 100,000 ก้อน (ที่มา : https://brickdd.com/) เพื่อประหยัดต้นทุนเนื่องจากเชื้อเพลิงในการเผาคือแกลบซึ่งต้องใช้ปริมาณมากและมีราคาประมาณตันละ 2000 บาท (ที่มา : https://brickdd.com/) เผาจนกระทั่งอิฐสุกซึ่งจะมีสีส้มมีความแข็ง และสามารถนำไปใช้งานได้ ดังภาพประกอบ 6

ภาพประกอบ 6 การเผาอิฐ
(ที่มา: https://brickdd.com)

2.1.3 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมของอิฐมอญ

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.) ของอิฐมอญ ประกอบด้วย มอก. 77-2565 และ มอก. 153-2565 โดยมีรายละเอียดดังนี้

1) มอก.77-2565 อิฐก่อสร้างสามัญ

อิฐก่อสร้างสามัญ มีลักษณะเป็นก้อนสี่เหลี่ยมตัน ใช้ในงานก่อสร้าง เช่น งานก่อผนังหรือกำแพง และต้องมีการฉาบปูน ลักษณะภายนอกทั่วไปต้องแข็งแรง ไม่มีรอยแตกร้าว หรือส่วนเสียหายอื่น ๆ ที่จะทำให้เกิดอุปสรรคต่อการก่อฉาบ ต้องมีผิวร่อง ผิวรอยหวี หรือผิวหยาบในด้านที่ก่อฉาบ ขนาดของอิฐก่อสร้างสามัญแต่ละมิติ จะมีเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนได้ไม่เกินเกณฑ์ที่สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกำหนด โดยการทดสอบต้องทำการวัดด้วยเครื่องมือที่วัดได้ละเอียดถึง 0.5 มิลลิเมตร เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนที่กำหนด ดังตารางที่ 2

ตาราง 2 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของขนาด อิฐมอญ

เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของขนาด อิฐมอญ มอก. 77-2545 ตามที่สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกำหนด	
ขนาดอิฐ (มิลลิเมตร)	ความคลาดเคลื่อน (มิลลิเมตร)
40	± 2
65 – 90	± 3
140 – 190	± 5

(ที่มา : สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม)

และต้องมีการทดสอบคุณภาพของอิฐอย่างสม่ำเสมอ หรืออย่างน้อย 1 ครั้งต่อปี ประกอบไปด้วยการทดสอบการต้านแรงอัด และการทดสอบการดูดกลืนน้ำจากสถาบันทดสอบที่เชื่อถือได้ ซึ่งผลต้องเป็นไปตามเกณฑ์ที่สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกำหนด โดยค่ากำลังรับแรงอัดมีเกณฑ์กำหนด ดังตารางที่ 3

พหุน ปณฺฑิโต ชีเว

ตาราง 3 ค่ากำลังอัดของอิฐมอญ

ชั้นคุณภาพ	ค่าต้านแรงอัดต่ำสุด (เมกกะปาสคาล) เฉลี่ย 5 ก้อน	ค่าต้านแรงอัดต่ำสุด (เมกกะปาสคาล) แต่ละก้อน	ค่าดูดกลืนน้ำสูงสุด (ร้อยละ) เฉลี่ย 5 ก้อน	ค่าดูดกลืนน้ำสูงสุด (ร้อยละ) แต่ละก้อน
ก	21.0	17.0	17.0	20.0
ข	17.0	15.0	22.0	25.0
ค	10.0	9.0	ไม่กำหนด	ไม่กำหนด

(ที่มา : สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม)

2) มอก.153-2565 อิฐกลวงก่อแผงไม่รับน้ำหนัก

อิฐกลวงก่อแผงไม่รับน้ำหนักเป็นอิฐที่มีลักษณะเป็นก้อนวัสดุดินเผาทำจากดินเหนียวปนทราย ดินทนไฟ หรือส่วนผสมของวัตถุเหล่านี้ มีรู หรือโพรง ใช้สำหรับก่อผนัง กำแพงที่ไม่ต้องรับน้ำหนักใด ๆ นอกจากน้ำหนักตัวเอง โดยแบ่งประเภทความคงทนถาวรออกเป็น 3 ชั้นคุณภาพ คือ

1) ชั้นคุณภาพ ก เป็นอิฐที่มีความทนทานสูงต่อการผุกร่อน เนื่องจากลม ฟ้า อากาศ

2) ชั้นคุณภาพ ข เป็นอิฐที่มีความทนทานปานกลางต่อการผุกร่อน เนื่องจากลม ฟ้า อากาศ

3) ชั้นคุณภาพ ค เป็นอิฐสำหรับใช้ภายใน ไม่เหมาะกับการเผยผึ่งต่อลม ฟ้า อากาศ

ขนาดของอิฐกลวงก่อแผงไม่รับน้ำหนัก จะมีเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนได้ไม่เกินเกณฑ์ที่สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกำหนด ตามตารางที่ 4 ซึ่งการทดสอบต้องทำโดยการวัดด้วยเครื่องมือที่วัดได้ละเอียดถึง 0.5 มิลลิเมตร

พหุน ปณฺ ฑิโต ชีเว

ตาราง 4 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของขนาดอิฐกลวงก่อแผงไม่รับน้ำหนัก

เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของขนาด อิฐแดง มอก. 153-2565 ตามที่สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกำหนด		
ขนาดอิฐ (มิลลิเมตร)	ความคลาดเคลื่อน (มิลลิเมตร)	
	ประเภทที่ 1	ประเภทที่ 2
40 – 90	± 2	± 3
110 – 120	± 3	± 5
160 – 190	± 4	± 6
250	± 6	± 8

(ที่มา : สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม)

สีของอิฐกลวงก่อแผงไม่รับน้ำหนักจะเปลี่ยนแปรไปตามชนิดของดิน และอุณหภูมิที่เผา สีจึงไม่ใช่จุดบ่งชี้คุณภาพที่แน่นอนของอิฐกลวงก่อแผงไม่รับน้ำหนัก ซึ่งสามารถตรวจสอบคุณภาพได้จากการวัดค่าการดูดกลืนน้ำ โดยต้องเป็นไปตามเกณฑ์ที่สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกำหนด ดังตารางที่ 5

ตาราง 5 ค่าการดูดกลืนน้ำของอิฐมอญ

ค่าการดูดกลืนน้ำของอิฐมอญ มอก.153-2565 ตามที่สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกำหนด		
ชั้นคุณภาพ	ค่าดูดกลืนน้ำสูงสุด (ร้อยละ)	
	เฉลี่ย 5 ก้อน	แต่ละก้อน
ก	10	12
ข	14	16
ค	20	24

(ที่มา : สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม)

นอกจากนี้อิฐมอญจาก มอก.ทั้ง 2 ประเภท จะต้องมีเครื่องหมายฉลาก ที่บ่งบอกประเภทชั้นคุณภาพ หรือชื่อโรงงาน เครื่องหมายการค้าที่จดทะเบียนอยู่ด้านข้างทุกด้านของตัวอิฐ อย่างน้อย 1 ก้อน จากในกอง ให้เห็นชัดเจน

2.2 อิฐบล็อกประสาน

อิฐบล็อกประสานถูกออกแบบให้มีรู มีร่อง และมีเดือยบนอิฐ โดยทั่วไปแล้วอิฐบล็อกประสานจะมีความหนาแน่นประมาณ 1,400 ถึง 1,600 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (ที่มา : https://www.facebook.com/Allaboutban) ซึ่งสามารถก่อสร้างได้รวดเร็วและสวยงามโดยที่ไม่ต้องฉาบ ไม่ต้องทาสี เป็นผนังรับน้ำหนัก ปลูกบ้านไร้เสา ลดขั้นตอนการก่อสร้าง ใช้วัตถุดิบ ดินลูกรัง ทราย ซึ่งหาได้ง่ายในท้องถิ่น ใช้วัสดุจากธรรมชาติในการผลิต มีความแข็งแรง ทนทาน ทำการก่อสร้างง่าย รวดเร็ว โดยไม่จำเป็นต้องใช้ทั้งเสา ประหยัดราคาในการก่อสร้างเนื่องจากใช้เหล็กเสริมน้อยลง และยังสามารถใช้แรงงานช่างในท้องถิ่นทั่วไป มีความสวยงามตามธรรมชาติ ไม่ต้องทาสี มีคุณสมบัติในการฉาบปูนหรือติดกระเบื้องได้เช่นเดียวกับผนังก่ออิฐทั่วไป ดังภาพประกอบที่ 7

ภาพประกอบ 7 ลักษณะของอิฐบล็อกประสาน

(ที่มา: www.itdangasia.com)

ในการใช้งานอิฐบล็อกประสานนั้นสามารถทำได้ในหลายรูปแบบ เช่น กำแพงรั้ว ผนัง หรือกำแพงรับน้ำหนัก โดยจะต้องมีการเสริมเหล็กทั้งแนวราบและแนวดิ่งเป็นระยะไม่เกิน 1.2 เมตร ดังภาพประกอบที่ 8

ภาพประกอบ 8 การนำอิฐบล็อกประสานไปใช้งาน

(ที่มา: www.itdangasia.com)

2.2.1 วัสดุส่วนผสมที่ใช้ผลิตอิฐบล็อกประสาน

วัตถุดิบในการผลิตอิฐบล็อกประสานมีดังนี้ ดิน ซีเมนต์ น้ำสะอาด ทรายละเอียดหรือหินฝุ่น

1) ดิน ดินเกิดจากหินที่ผุพังไปตามกาลเวลาและการกระทำจากสภาพแวดล้อมต่างๆ ทั้งการพัดพาของน้ำ ลำธาร ฝนตก แดดออก และจากน้ำมือของมนุษย์ ดังนั้นดินจากแต่ละภูมิประเทศจะไม่เหมือนกัน ทั้งขนาดเม็ดดิน รูปร่าง ขนาดคละและแร่ธาตุต่างๆในดิน เมื่อมีความแตกต่างกันดังนั้นอัตราส่วนผสมที่ใช้ผลิตอิฐบล็อกประสานก็จะแตกต่างกันไป ดังนั้นก่อนการผลิตต้องตรวจสอบก่อนว่าดินของเรามีสภาพแบบไหน

การเลือกดินที่มีคุณภาพดี มีลักษณะวิธีการเหมือนแนวคิดของการแบ่งชั้นคุณภาพดินสำหรับทำถนน (ASTM D3282 Standard classification of soils and soil-aggregate mixtures for highway construction purposes) คือ มีฝุ่นดินน้อย มีมวลละเอียดแข็งตั้งแต่ร้อยละ 65 โดยน้ำหนักขึ้นไป ดังนั้นก่อนการผลิตต้องทำการตรวจสอบดินที่เราจะใช้เป็นวัตถุดิบโดยการทดสอบมีหลายขั้นตอน โดยทั่วไปอัตราส่วนในการผลิตอิฐบล็อกประสานจะมีอัตราส่วนดังนี้ ปูนซีเมนต์ : ดิน ประมาณ 1 : 6 ถ้าเนื้อมวลละเอียดอยู่ระหว่างร้อยละ 35 ถึง 50

เนื่องจากดินแต่ละแหล่งจะมีคุณสมบัติต่างๆที่ไม่เหมือนกันดินบางประเภทเหมาะสมต่อการใช้งานแต่บางประเภทที่ไม่เหมาะสมต่อการใช้งานถ้านำมาใช้จะทำให้ต้นทุนการผลิตสูงหรือเมื่อผลิตออกมาแล้วจะได้อิฐบล็อกประสานที่ไม่แข็งแรง

อิฐบล็อกประสานเป็นคอนกรีตบล็อกรับน้ำหนักประเภทหนึ่งที่ใช้เป็นโครงสร้างแทนเสาคานได้ ซึ่งมีความแข็งแกร่งสูงกว่าอิฐ หรือคอนกรีตบล็อกทั่วไปที่ขายตามท้องตลาดมาก เพราะอิฐทั่วไปใช้เป็นผนังไม่รับน้ำหนักได้เพียงอย่างเดียว ปูนซีเมนต์จึงเป็นต้นทุนวัตถุดิบหลักที่มากที่สุดในการผลิตบล็อก 1 ก้อน เพื่อให้ได้ความแข็งแกร่งเพียงพอการคัดเลือกและหาส่วนผสมดินที่ดีอาจช่วยลดสัดส่วนการใช้ปูนต่อก้อนได้ จากอัตราส่วนปูนต่อดิน 1 : 6 อาจลดลงได้เป็น 1 : 12 ได้ ซึ่งลดการใช้ปูนซีเมนต์ได้ถึงร้อยละ 50

2) ปูนซีเมนต์ในการผลิตอิฐบล็อกประสาน ซีเมนต์ที่ใช้จะเลือกใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 และได้รับมาตรฐาน มอก. สาเหตุที่เลือกใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 นั้นเพราะความคุ้มค่าต่อราคาสูงสุด สามารถผลิตอิฐบล็อกประสานให้ได้กำลังตามมาตรฐานโดยใช้ปูนซีเมนต์ไม่มากเกินไปและที่สำคัญคือสะดวกสามารถหาได้ทั่วไป การใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 จะทำให้อิฐบล็อกประสานมีความแข็งแกร่ง ทนต่อการกัดกร่อนของน้ำได้ดี โดยปูนซีเมนต์เมื่อผสมกับน้ำจะเกิดเป็นของเหลวที่มีความหนืดหรือเรียกว่า “ซีเมนต์เพสต์” ซึ่งจะทำหน้าที่ประสานมวลรวมเข้าไว้ด้วยกัน เมื่อเวลาผ่านไปซีเมนต์เพสต์จะเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นของแข็งเพื่อยึดมวลรวมเข้าไว้ด้วยกัน

การที่ซีเมนต์เพสต์สามารถเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นของแข็งได้นั้นก็อันเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่เรียกว่าปฏิกิริยาไฮเดรชั่น (Hydration of cement) โดยปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นใน 2 ลักษณะคือ

1) อาศัยสารละลาย ซีเมนต์จะละลายในน้ำก่อให้เกิดไอออนในสารละลายและไอออนนี้จะผสมกันทำให้เกิดสารประกอบใหม่ขึ้น

2) เกิดปฏิกิริยาระหว่างของแข็ง ปฏิกิริยานี้จะเกิดขึ้นโดยตรงที่ผิวของของแข็งโดยไม่จำเป็นต้องใช้สารละลาย ปฏิกิริยาประเภทนี้เรียกว่า “Solid state reaction” ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของซีเมนต์จะเกิดขึ้นทั้ง 2 ลักษณะ โดยในช่วงแรกจะอาศัยสารละลาย และในช่วงต่อไปจะเกิดปฏิกิริยาระหว่างของแข็ง ซีเมนต์ประกอบด้วยสารประกอบหลายชนิด เมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นผลิตภัณฑ์ที่ได้อาจเกิดปฏิกิริยาต่อไปทำให้มันแตกต่างจากผลิตภัณฑ์ในครั้งแรก โดยแยกพิจารณาของสารประกอบหลักของซีเมนต์แต่ละประเภทดังนี้

ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของแคลเซียมซิลิเกต (C_3S และ C_2S)

แคลเซียมซิลิเกตจะทำปฏิกิริยากับน้ำก่อให้เกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ $Ca(OH)_2$ และ สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium silicate hydrate หรือ CSH) ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสาน ดังแสดงในภาพประกอบที่ 9 และสมการการเกิดปฏิกิริยาดังนี้

สมการของ C_3S

$2(3CaO \bullet SiO_2) + 6H_2O \text{ ----> } 3CaO \bullet 2SiO_2 \bullet 3H_2O + 3Ca(OH)_2$

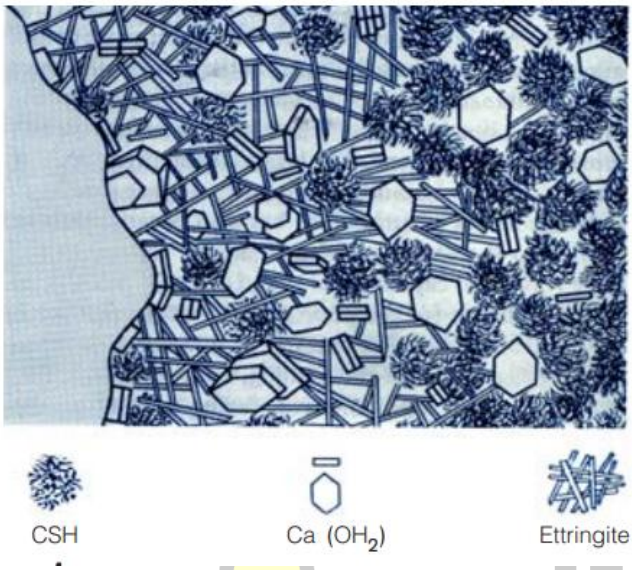
หรือ $2C_3S + 6H \text{ ----> } C_3S_2H_3 + 3CH$

สมการของ C_2S

$2(2CaO \bullet SiO_2) + 4H_2O \text{ ----> } 3CaO \bullet 2SiO_2 \bullet 3H_2O + Ca(OH)_2$

หรือ $2C_2S + 4H \text{ ----> } C_3S_2H_3 + CH$

พหุน ปณฺ ฑิโต ชีเว



ภาพประกอบ 9 ปฏิกิริยาของคัลเซียมซิลิเกต
(ที่มา: https://www.cpacacademy.com)

ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A) ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของไตรแคลเซียมอลูมิเนตจะเกิดทันทีทันใด และก่อให้เกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็วของซีเมนต์เพสต์ ดังสมการ

สมการของ C_3A

$3Ca\ O \bullet Al_2O_3 + 6H_2O \text{ ----> } 3CaO \bullet Al_2O_3 \bullet 6H_2O$

หรือ $C_3A + 6H \text{ ----> } C_3AH_6$

ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของเตตระแคลเซี่ยม อลูมิโนเฟอร์ไรท์ (C_4AF) ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของ C_4AF นี้จะเกิดในช่วงต้น โดย C_4AF จะทำปฏิกิริยากับยิบซั่ม และ $Ca(OH)_2$ ก่อให้เกิดอนุภาคที่มีรูปร่างเหมือนเข็ม Sulphoaluminate และ Sulphoferrite ดังสมการ

สมการของ C_4AF

$4CaO \bullet Al_2O_3 \bullet Fe_2O_3 + CaSO_4 \bullet 2H_2O + Ca(OH)_2 \text{ ----> } 3CaO(Al_2O_3, Fe_2O_3) \bullet 3CaSO_4$

เวลาที่ใช้เพื่อให้บรรลุร้อยละ 80 ของปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของสารประกอบหลักทั้ง 4 ชนิด ตังแสดงในตารางที่ 6

ตาราง 6 เวลาทำการปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของสารประกอบหลัก สำเร็จร้อยละ 80

สารประกอบหลัก	เวลา (วัน)
C_3S	10
C_2S	100
C_3A	6
C_4AF	50

(ที่มา: https://www.cpacacademy.com)

3) น้ำสะอาด น้ำที่ใช้ในการผสมดินซีเมนต์ต้องเป็นน้ำสะอาดปราศจากสารเจือปน หรือสารอินทรีย์ต่างๆ ไม่มีความเป็นกรดหรือด่าง หรือคราบน้ำมัน ดังนั้นถ้าไม่แน่ใจก็ใช้น้ำสะอาดที่ใช้ดื่มได้ เพราะว่าน้ำจะเป็นตัวเข้าไปทำปฏิกิริยากับซีเมนต์โดยตรง ดังนั้นถ้าในน้ำมีสารอินทรีย์ หรือมีสภาพเป็นกรด ด่าง ก็จะทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้ไม่เต็มที่ทำให้ได้กำลังไม่สูงมากเท่าที่ต้องการอิฐบล็อกประสานที่ผลิตออกมาก็จะไม่ได้มาตรฐาน

4) ทรายละเอียด หินฝุ่น จะใช้ในกรณีที่ดินที่เป็นแหล่งวัตถุดิบมีสภาพไม่เหมาะสมและต้องมีการปรับปรุงคุณภาพก่อนนำมาผลิต เพื่อปรับสัดส่วนขนาดคละใหม่ให้มีความเหมาะสม วัสดุที่นำมาใช้ผสมเพื่อปรับขนาดคละต้องทราบแหล่งของวัตถุดิบที่แน่นอน เนื่องจากวัตถุดิบแต่ละที่คุณสมบัติจะแตกต่างกัน ทำให้เกิดความแปรปรวนได้หากใช้จากแหล่งที่แตกต่างกัน

อัตราส่วนผสม

อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมในการผลิตอิฐบล็อคประสานจะขึ้นอยู่กับการสุ่มอัตราส่วน ปูนซีเมนต์ : ดิน เริ่มต้นตั้งแต่ 1 :5 ถึง 1:10 จนกว่าจะพบว่าอัตราส่วนไหนที่ใช้แล้วทำงานง่าย แข็งแรง ขอบมุมไม่รุ่ย ไม่ร้าวเมื่อแห้ง ไม่ยุ่ยเมื่อถูกน้ำ แล้วค่อยทำการทดสอบการรับกำลังอัดว่าผ่านมาตรฐานหรือไม่ ถ้าผ่านก็ถือว่าอัตราส่วนนั้นใช้ได้

อัตราส่วนผสมที่แท้จริงจะดูจากผลทดสอบการรับกำลังอัดว่าอัตราส่วนผสมของ ปูนซีเมนต์ : ดิน ที่ผ่านการทดสอบเป็นอัตราส่วนใด

2.2.2 วิธีการผลิตอิฐบล็อกประสาน

การผลิตอิฐบล็อกประสานมีขั้นตอนดังนี้

1) นำดินแดงหรือดินลูกรังที่เตรียมไว้เข้าเครื่องตีดินเพื่อให้ได้ดินละเอียด ดังภาพประกอบที่ 10

ภาพประกอบ 10 การตีดินให้ละเอียด
(ที่มา: https://www.bansuanporpeang.com)

2) นำดินที่ผ่านการตีและปูนซีเมนต์ใส่ลงในเครื่องผสมดินตามอัตราส่วนที่ออกแบบไว้ ทำการผสมดินกับปูนซีเมนต์ให้เข้ากัน แล้วทำการเติมน้ำลงในเครื่องผสมดินด้วยถังบัวรดน้ำหรือสายยางต่อหัวฉีดฝอยจนดินมีความชื้นพอดี ดังภาพประกอบที่ 11

ภาพประกอบ 11 การผสมดินกับปูนซีเมนต์และน้ำ
(ที่มา:https://www.bansuanporpeang.com)

3) นำดินที่ผสมเข้ากันได้ดีแล้วลำเลียงสายพานขึ้นไปเก็บบนถังเก็บวัสดุบนเครื่องอัดอิฐบล็อกประสานแบบไฮดรอลิก หรือ ใช้เครื่องอัดด้วยแรงคนแบบมือโยกใช้การทดแรงแบบคานงัดคานดีด ดังภาพประกอบที่ 12

ภาพประกอบ 12 การอัดก้อนบล็อกประสาน
(ที่มา:https://www.bansuanporpeang.com)

4) ทำการอัดอิฐบล็อกประสานด้วยไฮดรอลิกหรืออัดด้วยเครื่องอัดแรงคนจนได้อิฐบล็อกประสานออกมา ดังภาพประกอบที่ 13

ภาพประกอบ 13 ก้อนอิฐบล็อกประสานที่ทำการอัดขึ้นรูปแล้ว
(ที่มา:https://www.bansuanporpeang.com)

8) นำอิฐบล็อกประสานเข้าบ่มในโรงบ่มที่ร่มโดยไม่ให้โดนแดดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จนแห้ง

9) ทำการรดน้ำก้อนบล็อกประสานหรือใช้กระสอบป่านชื้นคลุมอิฐบล็อกประสานในโรงบ่มที่ร่ม ห้ามโดนแดดเป็นเวลา 7 ถึง 10 วัน ในการบ่มบล็อกประสานนั้นควรใช้ปริมาณน้ำที่พอเหมาะไม่มากไปหรือน้อยไป ควรใช้ฝักบัวหรือฉีดน้ำให้เป็นละอองก็พอ โดยถ้าปริมาณน้ำมากไป

อาจทำให้อิฐบล็อกประสานเกิดคราบขาวจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ไหลออกมาจากผิวก้อนอิฐบล็อกประสานได้

2.2.3 มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนอิฐบล็อกประสาน

โดยมาตรฐานอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ชุมชนอิฐบล็อกประสาน มผช. 602/2547 ได้กำหนดคุณสมบัติไว้คือ อิฐบล็อกประสาน หมายถึงอิฐบล็อกที่ได้จากการนำดินลูกรัง ผสมกับปูนซีเมนต์และน้ำในอัตราส่วนที่เหมาะสม อาจผสมวัสดุอื่นๆ เช่น หินฝุ่น ทราย ผสมให้เข้ากัน เทลงในแบบพิมพ์ที่มีการออกแบบให้มีรูร่อง และเดือย อัดเป็นก้อน แล้วบ่มให้แข็งตัว โดยได้กำหนดนิยามของอิฐบล็อกประสานดังนี้

1) อิฐบล็อกประสาน ชนิดรับน้ำหนัก หมายถึง อิฐบล็อกประสานที่ใช้ก่อเพื่อรับน้ำหนักโครงสร้างอาคารได้เช่น ก่อเสา ก่อผนัง

2) อิฐบล็อกประสานชนิดไม่รับน้ำหนัก หมายถึง อิฐบล็อกประสานที่ใช้ก่อผนังกั้นห้องหรือก่อส่วนอื่นภายในอาคารที่ไม่ใช่ส่วนที่ต้องรับน้ำหนักโครงสร้างอาคาร

3) คุณลักษณะที่ต้องการตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน (มผช.602/2547) ลักษณะทั่วไป ต้องไม่มีรอยแตกหรือร้าว อาจบิ่นได้เล็กน้อย มิติต้องเป็นไปตามที่ระบุไว้ที่ฉลาก โดยแต่ละมิติมีเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนได้ไม่เกิน ± 2 มิลลิเมตร ความต้านแรงอัด ชนิดรับหนัก ค่าเฉลี่ยต้องไม่น้อยกว่า 7.0 เมกกะปาสคาล ชนิดไม่รับน้ำหนักค่าเฉลี่ยต้องไม่น้อยกว่า 2.5 เมกกะปาสคาล การดูดกลืนน้ำ(เฉพาะชนิดรับน้ำหนัก) ต้องเป็นไปตามตารางที่ 7

ตาราง 7 ค่ากำหนดการดูดกลืนน้ำของอิฐบล็อกประสานชนิดรับน้ำหนัก

น้ำหนักอิฐบล็อกประสานเมื่ออบแห้ง (กิโลกรัม)	การดูดกลืนน้ำสูงสุด เฉลี่ยจากอิฐบล็อกประสาน 5 ก้อน กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร
1,680 และ น้อยกว่า	288
1,681 - 1,760	272
1,761 - 1,840	256
1,841 - 1,920	240
1,921 - 2,000	224
มากกว่า 2,000	208

(ที่มา : สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม)

2.3 ซีโอไลท์

ซีโอไลท์เป็นผลึกอลูมิโนซิลิเกตมีพื้นที่ผิวสูงและมีรูพรุนขนาดเล็กถึงระดับไมโคร (1-10 อังสตรอม) ซึ่งประกอบด้วยอะตอมของซิลิคอน (Si) และ อลูมิเนียม (Ai) เป็นหลักโดยเชื่อมต่อกันผ่านอะตอมออกซิเจนทั้งนี้ด้วยสัดส่วนขององค์ประกอบระหว่างปริมาณ ร้อยละ Si และ ร้อยละ Ai ที่แตกต่างกันทำให้เกิดสารประกอบซีโอไลท์ที่มีโครงสร้างและรูปร่างขอผลึกที่หลากหลายจึงสามารถจัดชนิดของซีโอไลท์ได้อีกมากมายเช่น Zeolite beta, Zeolite ZS-5, Zeolite ferrierite (FER) และ Zeolite Y และอีกมากมาย

ในปัจจุบันการค้นพบซีโอไลท์มากถึง 600 ชนิดโดยเราสามารถแบ่งกลุ่มตามโครงสร้างได้ราว 40 ชนิด จำแนกได้ด้วยความแตกต่างทางโครงสร้างและขนาดของรูพรุนตามที่กล่าวมาข้างต้น ทำให้ซีโอไลท์ถูกนำมาใช้ในงานหลากหลายด้านได้แก่

1) ดูดซับ (Adsorption) ซีโอไลท์ที่มีรูพรุนขนาดเล็กจึงมีพื้นที่ผิวสูง นิยมใช้ในการดูดซับทางเคมี สามารถดูดซับสารได้ทั้งอยู่ในลักษณะแก๊สและของเหลวเช่น การดูดซับสารแอมโมเนียที่ส่งกับกลิ่นเหม็นในน้ำทิ้งและยังช่วยดูดซับก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) จากไอเสียที่ปล่อยจากโรงงานด้วย Zeolite zeta

2) ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) มักใช้ซีโอไลท์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมีเช่น Zeolite ZSM-5 และ Zeolite zeta ที่สามารถใช้เป็นตัวช่วยเร่งปฏิกิริยา Isomerization และใช้สำหรับการเติมหมู่แอลคิล (Alkyl group) ของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน

3) แยกสารเคมี (Chemical separation) เนื่องจากรูพรุนที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางน้อยกว่า 2 นาโนเมตร (Microporous structure) จึงนิยมใช้ในกระบวนการแยกสารในกลุ่มสารอินทรีย์เช่น Zeolite ferrierite (FER) ใช้ในกระบวนการแยกสารประกอบ N-butane และ Iso-butane และช่วยกำจัดแอมโมเนียในน้ำทิ้งและกำจัดโลหะหนัก

4) แยกโมเลกุลทางเคมี (Cracking process) ใช้ในกระบวนการแตกตัวโมเลกุลทางเคมี เช่น Zeolite Y ใช้แยกโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดใหญ่ออกเป็นน้ำมันเบนซิน ดีเซล น้ำมันก๊าด ขี้ผึ้ง และผลพลอยได้อื่นๆ ของปิโตรเลียมทุกชนิด

อีกทั้งยังมีการใช้งานซีโอไลท์ในประโยชน์ด้านอื่นๆ เช่น ช่วยลดการปลดปล่อยแก๊สพิษจากอุตสาหกรรม เช่น แก๊สไนโตรเจนออกไซด์ แก๊สซัลเฟอร์ออกไซด์หรือแก๊สคาร์บอนออกไซด์ และงานประเภทอื่นๆได้อีกด้วย

โครงสร้างทางเคมีของซีโอไลท์

ซีโอไลท์มีโครงสร้างพื้นฐาน (Sub unit หรือ Primary unit) เป็นรูปทรงสามเหลี่ยมสี่หน้า (Tetrahedron) ของ Sio_4 และ Aio_4 แต่ละหน่วยย่อย (Sub unit) จะเชื่อมต่อกันเป็นโครงข่าย

(Frame work) เรียกว่า Secondary building unit (SBU) ในแบบต่างๆ ดังแสดงในภาพประกอบที่ 14 และภาพประกอบที่ 15 โดยชนิดของตัวอย่างซีโอไลท์ที่สำคัญ คือ

กลุ่มที่ 1 : Single 4-ring

Analcime	$Na_{16}[(AlO_2)_{16}(Sio_2)_{32}]\ .16H_2O$
Phillipsitc	$(k,Na)_{10}[(ALO_2)_{10}(Sio_2)_{22}].20H_2O$
Laumonitc	$Ca_4[(AlO_2)_8(Sio_2)_{46}].16H_2O$

กลุ่มที่ 2 : Single 6-ring

Erionite	$(Ca,Mg,K_2,Na_2)_{4.5}[(AlO_2)_{27}].27H_2O$

กลุ่มที่ 3 : Double 4-ring

A(Linde)	$Na_{12}[(AlO_2)_{12}(Sio_2)_{12}]\ .27H_2O$

กลุ่มที่ 4 : Double 6-ring

Chabazite	$Ca_2[(AlO_2)_4(Sio_2)_8].13H_2O$

กลุ่มที่ 5 : Complex 4-1

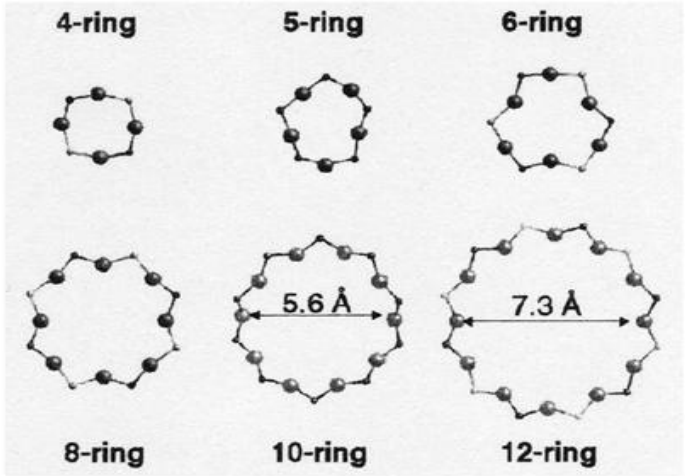
Natrolite	$Na_{16}[(AlO_2)_{16}(Sio_2)_{24}]\ .16H_2O$

กลุ่มที่ 6 : Complex 5-1

Mordenite	$Na_8[(AlO_2)_8(Sio_2)_{40}]\ .24H_2O$

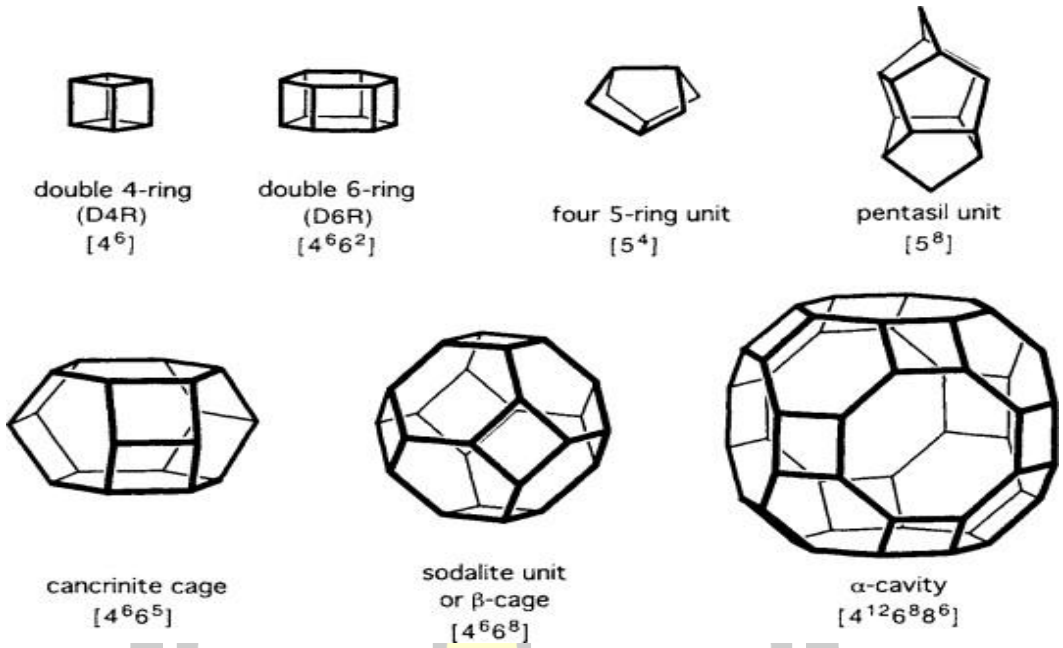
กลุ่มที่ 7 : Complex 4-4-1

Clinoptilolite	$Na_{16}[(AlO_2)_6(Sio_2)_{30}]\ .24H_2O$



ภาพประกอบ 14 รูปแบบโครงสร้างของซีโอไลท์

(ที่มา: http://article.sapub.org/10.5923.j.materials.20170705.12.html)



ภาพประกอบ 15 รูปแบบโครงสร้างของซีโอไลท์
(ที่มา:https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167299105800059)

ในบางกรณีจะเชื่อมต่อเป็นโครงข่าย (Frame work) แบบรูปทรงหลายเหลี่ยมเช่น รูปทรงแปดหน้า (Octahedral) ที่มีการกำหนดค่า (Configuration) α, β, r, ε

ซีโอไลท์มีทั้งที่พบในธรรมชาติและสังเคราะห์ขึ้นแต่ละชนิดจะมีโครงสร้างที่แตกต่างกัน เนื่องจากโครงสร้างโมเลกุลที่แตกต่างกัน ดังนั้นจะมีคุณสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์แตกต่างกัน

คุณสมบัติและประโยชน์ของซีโอไลท์

คุณสมบัติของซีโอไลท์แบ่งออกอย่างกว้างๆได้ 3 อย่าง คือ การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange), การดูดซับน้ำ (Water absorption) และ การดูดซับแก๊ส (Gas absorption)

1) การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) ซีโอไลท์มีสารประกอบผิดในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกได้ดีมาก คุณสมบัตินี้ทำให้การใช้ซีโอไลท์เป็นไปอย่างกว้างขวาง เช่น ใช้ในการกำจัดกากนิวเคลียร์โดยทำกากนิวเคลียร์ที่ได้ผ่าน คอลัมน์ที่บรรจุแร่ซีโอไลท์ ซีเซียม 134 (Cesium 134), ซีเซียม 187 (Cesium 187),และ สตรอนเซียม-90 (Strontium 90) จะถูกดูดไว้ที่คอลัมน์แล้วนำคอลัมน์ที่ดูดไว้มีไปเก็บไว้ในที่ที่ปลอดภัยต่อไป ซีโอไลท์โดยเฉพาะ Clinoptilolite และ Chabazite ใช้กำจัดกากนิวเคลียร์มาเป็นเวลากว่า 30 ปีแล้ว การใช้ประโยชน์ของซีโอไลท์ที่สำคัญอีกอย่างคือการนำไปกำจัดของเสียที่เกิดจากการถลุงและการทำโลหะบริสุทธิ์ ในสหรัฐอเมริกา

องค์การป้องกันและดูแลสิ่งแวดล้อม (Environment pretection agency) ถือว่ากากที่ได้จากโลหะกรรมนั้นเป็นพิษและมีอันตราย ก่อนจะนำซีโอไลท์ไปใช้ในการกำจัดของเสียใดๆต้องศึกษาก่อนว่าในกระบวนการนั้นๆ มีปริมาณโลหะหนักที่จะต้องกำจัดมากน้อยเพียงใด เมื่อรู้ปริมาณของกากที่จะกำจัดแล้วก็สามารถเลือกใช้ชนิดของซีโอไลท์ให้เหมาะสมได้ ซีโอไลท์ยังมีการใช้แพร่หลายในการเลี้ยงปลา ซึ่งปลาส่วนมากจะเลี้ยงในบ่อจึงมีปัญหาโดยของเสียที่ปลาขับถ่ายออกมาจะมีปริมาณของแอมโมเนียมมาก และมักจะแก้ปัญหากันโดยถ่ายน้ำเสียออกไปแล้วเปลี่ยนเอาน้ำดีเข้าไปใหม่ ซึ่งจะมีผลเสียตามมาคือทำให้ปลาบอบช้ำเวลาถ่ายน้ำไปมา มีการศึกษาว่าถ้ามีแอมโมเนียมเพียงจำนวนเล็กน้อย 2 ถึง 3 ppm ในบ่อปลาจะมีผลเสียต่อไปอย่างมากจะทำให้ปลาเป็นโรคเหงื่อ และหยุดการเจริญเติบโต การใช้ซีโอไลท์ โดยเฉพาะชนิด Clinoprilolite และ Mordenite ใส่ลงในบ่อปลาปริมาณเพียง 0.3 มิลลิกรัมต่อลิตร ก็สามารถกำจัดเต็มออกได้ร้อยละ 97 ถึง 99

2) คุณสมบัติในการดูดน้ำและคายน้ำ (Water absorption) ซีโอไลท์มีคุณสมบัติในการดูดซึมน้ำ และคายน้ำออกได้ดีโดยรูปร่างผลึกของมันไม่เปลี่ยนแปลงมีการใช้ซีโอไลท์ควบคุมระดับของความชื้นที่ต่ำ ๆ ในขณะที่สารดูดความชื้นตัวอื่นไม่สามารถทำได้

3) คุณสมบัติในการดูดก๊าซ (Gas absorption) มีการใช้ซีโอไลท์ชนิด Chabazite ในการดูดก๊าซที่ปนมากับก๊าซธรรมชาติ ในเมืองลอสแอนเจลิสประเทศสหรัฐอเมริกาได้ใช้ Chabazite ดูดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Co_2), ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) และ น้ำ (H_2O) ได้ถึงร้อยละ 25

2.4 การปรับปรุงดินโดยใช้ปูนซีเมนต์

2.4.1 วิวัฒนาการของดินซีเมนต์

การปรับปรุงคุณภาพของดินด้วยปูนซีเมนต์เริ่มต้นครั้งแรกเมื่อปี ค.ศ 1915 ในการก่อสร้างถนน Oak ในเมืองซาราโซตาประเทศสหรัฐอเมริกา โดยการขุดเอาเปลือกหอยในอ่าวขึ้นมาผสมกับทรายและปูนซีเมนต์แล้วทำการบดอัดด้วยรถบดไอน้ำขนาด 10 ตัน แทนการทำถนนคอนกรีตเนื่องจากเครื่องผสมคอนกรีตเสีย (Davidson, 1961)

ในปี ค.ศ 1935 มีการใช้ดินซีเมนต์ในโครงการก่อสร้างถนนและพื้นสนามบินในสหรัฐอเมริกาอย่างกว้างขวาง (Davidson,1961)

ในปี ค.ศ 1940 ประเทศสหรัฐอเมริกามีการก่อสร้างถนนด้วยดินซีเมนต์พื้นที่มากกว่า 7.5 ล้านตารางหลาในปี ค.ศ 1941 ถึง ค.ศ 1944 ซึ่งเป็นช่วงสงครามโลกครั้งที่ 2 มีการนำดินซีเมนต์มาใช้ในงานสนามบินมีพื้นที่ประมาณ 22 ล้านตารางหลา ซึ่งช่วงเวลานี้งานด้านถนนได้หยุดชะงักลงชั่วคราว จนกระทั่งสงครามโลกยุติการก่อสร้างถนนด้วยดินซีเมนต์จึงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งส่วนใหญ่นำไปใช้เป็นวัสดุรองพื้นทางของผิวถนนคอนกรีต ใช้เป็น ไหล่ทาง ที่จอดรถ พื้นคลังสินค้า และยังใช้งานดาดพื้นฐานเก็บน้ำ คูคลองด้วยซีเมนต์ (Association, 1956)

การปรับปรุงดินด้วยซีเมนต์นั้นคือการนำดินธรรมชาติที่ผ่านการคัดเลือก โดยการทดสอบคุณสมบัติทั้งเอกภาพ และเคมี เหมาะสมที่จะนำมาใช้ผสมปูนซีเมนต์และน้ำ ในสัดสวนที่เหมาะสม และผ่านกรรมวิธีการผลิตได้เป็นวัสดุที่สามารถรับกำลังได้และใช้เป็นประโยชน์ในงานก่อสร้างและนั้น หมายถึงการนำวัสดุที่ไม่ได้มาตรฐานทำให้เป็นวัสดุที่ได้มาตรฐาน

Highway research board's committee on soil – portland cement stabilization (1959) ได้ให้คำจำกัดความของ Cement – treated soil ว่าเป็นการนำเอาดินและปูนซีเมนต์ในปริมาณที่ต้องการมาผสมกับน้ำให้เข้ากันแล้วบดอัดให้ได้ความหนาแน่นสูงสุดและป้องกันความชื้นไม่ให้สูญเสียไปในระหว่างการบ่มดินซีเมนต์สามารถแยกประเภทต่าง ๆ ได้ดังต่อไปนี้

1) ดินซีเมนต์ (Soil – cement) คือดินผสมปูนซีเมนต์และน้ำและบดอัดโดยวิธีก้นและทำการบ่มให้แข็งตัวความแข็งแรงจะพิจารณาจากค่าความทนทานและค่ากำลังอัดของดินซีเมนต์

2) ปรับปรุงดินจำพวกทรายและกรวด (Cement – modified granular soil mixture) เป็นวัสดุผสมปูนซีเมนต์เพื่อปรับปรุงคุณภาพบางอย่างของดินจำพวกทรายและกรวด (Granular soil) ปูนซีเมนต์ที่ใช้ในวัสดุผสมจะใช้เพื่อลดสมบัติทางด้านพลาสติกและการบวมตัว ด้วยเหตุนี้จึงเป็นการปรับปรุงวัสดุประเภทดินจำพวกทรายและกรวด (Granular soil) ในลักษณะดังกล่าวมีที่มีสมบัติต่ำกว่ามาตรฐาน เพื่อใช้ในงานพื้นทางหรือรองพื้นทางสำหรับทั้งถนนคอนกรีตและถนนลาดยาง ปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้อยู่ประมาณร้อยละ 1 ถึง 3 ของน้ำหนักดินขึ้นไป และปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้มักจะปริมาณน้อยกว่าที่ใช้ในดินซีเมนต์

3) ปรับปรุงดินปนทรายและดินเหนียว (Cement – modified silty – clay soil) เป็นการใช้ปูนซีเมนต์เพื่อควบคุมการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของดินจุดประสงค์การปรับปรุงดินปนทรายและดินเหนียว (Cement – modified silty – clay soil) ก็เพื่อปรับปรุงคุณภาพดินที่อ่อนผิดปกติหรือพื้นที่ดินเปียกแฉะการปรับปรุงคุณภาพโดยวิธีการนี้ใช้ปูนซีเมนต์น้อยกว่าดินซีเมนต์

4) Plastic soil – cement เป็นดินผสมปูนซีเมนต์ที่จะต้องมีน้ำมากพอที่จะทำให้ส่วนผสมมีสภาพเหลวมากพอที่จะนำไปใช้ในงานดาดปูลงในพื้นที่ที่มีความลาดเอียงได้ส่วนมากจะใช้ปูด้านข้างของถนนเพื่อระบายน้ำปูด้านข้างของคลองส่งน้ำ และปูอ่างเก็บน้ำ ความสามารถในการรับน้ำหนักความคงทนมีคุณสมบัติคล้าย ๆ ดินซีเมนต์

5) Cement – treated soil slurries and grouts เป็นดินผสมกับปูนซีเมนต์โดยมีปริมาณน้ำที่สูงและอาจต้องมีสารผสมเพิ่มอื่น ๆ เพื่อปรับปรุงคุณภาพของส่วนผสมให้มี ความสามารถทำงานได้ (Workability) สูงพอที่จะนำมาใช้เป็นวัสดุอุดรอยรั่ว (Grouting material) ได้ การปรับปรุงดินด้วยวิธีนี้มักใช้ในการบำรุงรักษาถนนเช่น แก้ปัญหาการทรุดตัวของถนนหรือปรับปรุงถนนที่ถูกน้ำกัดเซาะหรือปรับปรุงการรับน้ำหนัก

2.4.2 กลไกการปรับปรุงคุณภาพของดินด้วยปูนซีเมนต์

Moh (1962) ได้ศึกษากระบวนการปรับปรุงคุณภาพของดินโดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และได้เสนอแนะว่า กลไกสำคัญของการเสริมความแข็งแรงของดินเกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ ได้แก่ ไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S), ไดแคลเซียมซิลิเกต (C_2S), ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A) และเตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอไรต์ (C_4AF) เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะเกิดสารประกอบที่มีลักษณะเป็นเจล เช่น แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (C-A-H) ซึ่งทำหน้าที่เป็นวัสดุเชื่อมประสานระหว่างอนุภาคของดิน ทำให้เกิดโครงสร้างที่มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม

นอกจากนี้ ปฏิกิริยาดังกล่าวยังทำให้เกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ซึ่งมีผลทำให้ความเป็นด่างในสารละลายรูพรุนเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เจลที่เกิดขึ้นมีการรวมตัวกันอย่างมั่นคงและมีคุณสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้นอย่างชัดเจน โดยเฉพาะในแง่ของกำลังอัด (Compressive strength) และความทนทานต่อความชื้น

ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการของ Moh ยังแสดงให้เห็นว่า สัดส่วนของซีเมนต์และระยะเวลาการบ่มเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อค่ากำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์ และเน้นย้ำถึงความจำเป็นในการควบคุมความชื้นในดินและวิธีการบ่มเพื่อให้เกิดการพัฒนาโครงสร้างที่มีประสิทธิภาพสูงสุดอายุการบ่ม

ในมวลดินที่มีขนาดเม็ดหยาบเมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น (Cement hydration) การยึดเกาะกันของเม็ดดินกันจะคล้ายกับในคอนกรีต แต่จะต่างกันที่ซีเมนต์เพลสต์ (Cement paste) จะไม่ไปอุดในช่องว่างระหว่างอนุภาคดิน โดยแรงยึดประสานจะเกิดจากแรงยึดเหนี่ยวของอนุภาคดินที่มีแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH)และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (CAH)เกาะอยู่ที่ผิวอนุภาค โดยซีเมนต์เพลสต์ (Cement paste) จะประสานอนุภาคดินที่อยู่ใกล้เคียงเข้าด้วยกัน ในระหว่างแข็งตัวและพัฒนาต่อเนื่องจนแข็งตัวมีโครงสร้างแข็งแรง

Herzong and Michell (1963) กล่าวว่าการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น (Cement hydration) เป็นการเกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และ แคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (CAH) ซึ่งเป็นกระบวนการช่วงแรก และปฏิกิริยาระหว่างซิลิกา (Silica) และ อะลูมินา (Alumina) ที่มีอยู่ในเม็ดดิน Calcium ions (Ca^{2+}) ที่เกิดจาก Released hydrate lime จะเป็นกระบวนการที่สองที่ทำให้เกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH)และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (CAH) ซึ่งต้องใช้ระยะเวลายาวนานกว่า จึงทำให้เกิดกำลังอัดของซีเมนต์สูงขึ้นตามอายุการบ่มที่เพิ่มขึ้น ซึ่งปฏิกิริยาดังกล่าวจะรู้จักโดยทั่วไปว่าปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic reaction)

Moh (1965) ได้เขียนปฏิกิริยาของดินซีเมนต์เป็นสมการทางเคมีดังต่อไปนี้

$Cement + H_2O$ ----------> $CSH + CAH + Ca(OH)_2$

$Ca(OH)_2$ ----------> $Ca^{++} + 2(OH)$

$Ca^{++} + 2(OH) + Sio_2$ (soil silica) ----------> CSH

$Ca^{++} + 2(OH) + Al_2O_3$ (soil alumina) ----------> CAH

เมื่อ CSH = calcium silicate hydrate

CAH = calcium aluminate hydrate

Ca (OH)2 = calcium hydroxide

Reddy และคณะ (2024) ได้อธิบายว่า การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยปูนซีเมนต์เป็นกระบวนการที่อาศัยกลไกทางฟิสิกส์และเคมีร่วมกัน (Physico-chemical mechanisms) ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 กลไกหลัก ได้แก่

1) ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration reaction) เป็นกลไกหลักที่เกิดขึ้นเมื่อปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับน้ำ ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ไฮเดรชัน ได้แก่ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ซึ่งจะช่วยเชื่อมอนุภาคดินให้ติดกันแน่นยิ่งขึ้น ส่งผลให้ดินมีความแข็งแรงและเสถียรภาพที่ดีขึ้น

2) การแลกเปลี่ยนไอออนบวก (Cation exchange) เกิดขึ้นเมื่อไอออนบวกจากปูนซีเมนต์เข้ามาแทนที่ไอออนบวกเดิมบนผิวของอนุภาคดิน โดยเฉพาะในดินเหนียว ทำให้ดินเกิดการรวมตัวเป็นกลุ่ม ลดค่าความเป็นพลาสติก (Plasticity index) และลดความไวต่อความชื้น

3) ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic reaction) เป็นปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นอย่างช้า ๆ ระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ที่เกิดจากการไฮเดรชันของซีเมนต์กับซิลิกา (SiO_2) หรืออะลูมินา (Al_2O_3) ที่มีอยู่ในดิน ทำให้เกิดสารเจล เช่น C-S-H และ C-A-H ซึ่งเป็นสารเชื่อมประสานอนุภาคดินในระยะยาว ส่งผลต่อการเพิ่มกำลังรับแรงอัดของดินตามอายุการบ่ม

4) การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางวิศวกรรม (Improved engineering properties) หลังจากการปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ พบว่าดินมีความหนาแน่นแห้งสูงขึ้น ความชื้นที่เหมาะสมเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย และค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว (Unconfined compressive strength: UCS) เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะเมื่อผ่านการบ่มในระยะเวลา 7–28 วัน

2.4.3 อัตราส่วนของปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมสำหรับดินแต่ละประเภท

องค์ประกอบที่มีอิทธิพลต่อดินซีเมนต์จะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง สมบัติของดินส่วนประกอบที่มีตามธรรมชาติของดินทั้งทางกายภาพและเคมีมีจะผลต่อปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเมื่อผสมกับปูนซีเมนต์และน้ำ ด้วยเหตุผลนี้จึงมีผลกระทบต่อการรับแรงและความคงทนของดินซีเมนต์ ส่วนประกอบที่กล่าวนี้รวมทั้งทางด้านฟิสิกส์และด้านเคมี เป็นต้นว่าปริมาณส่วนผสมของ ทราย, ดินเหนียว,และพวก อินทรียวัตถุ หรือ ซัลเฟต (Sulphate) ที่มีอยู่ในดิน การหาปริมาณปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมสามารถใช้ข้อมูลจากปัจจัยต่าง ๆ ต่อไปนี้ การจำแนกประเภทของดิน (Soil classification group) สภาพดินตามธรรมชาติของดินเป็นดัชนีบ่งชี้วัดที่บอกถึงปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของดิน โดยปริมาณของปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมจำแนกตามระบบ Unified และ AASHTO หรือชนิดของดิน ดังตารางที่ 8, 9 และ 10

ตาราง 8 ปริมาณปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมสำหรับดินแต่ละประเภท จำแนกตามระบบ Unified

ประเภทดิน (Soil classification)	ปริมาณปูนซีเมนต์ที่ประมาณไว้เบื้องต้น (ร้อยละโดยน้ำหนักแห้ง)
GW–SW	5
GP, SW–SM, SW–SC, SW–GM, SW–GC	6
GM, SM, GC, SC, SP–SM, SP–SC, GP–GM, GP–GC, SM–SC, GM–GC	7
SP, CL, ML, ML–CL	10
MH, OH	11
CH	10

ที่มา: Department of the Army & Department of the Air Force. (1994)

ตาราง 9 ปริมาณปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมสำหรับดินแต่ละประเภท จำแนกตามระบบ AASHTO

กลุ่มดิน (AASHTO Soil Group)	ช่วงปริมาณปูนซีเมนต์ที่ต้องการ (ร้อยละ โดยปริมาตร)	ช่วงปริมาณปูนซีเมนต์ที่ต้องการ (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)	ปริมาณปูนซีเมนต์โดยประมาณ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
A-1-a	5–7	3–5	5
A-1-b	7–9	5–8	6

A-2	7–10	5–9	7
A-3	8–12	7–11	9
A-4	8–12	7–12	10
A-5	8–12	8–13	10
A-6	10–14	9–15	12
A-7	10–14	10–16	13

ที่มา: National Cooperative Highway Research Program. (2009)

ตาราง 10 ปริมาณปูนซีเมนต์โดยเฉลี่ยที่ใช้ผสม สำหรับวัสดุชนิดต่าง ๆ

ประเภทของวัสดุ	ปริมาณปูนซีเมนต์ที่ทดสอบความหนาแน่นเปียก		ปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ทดสอบแช่แข็ง - ละลาย (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
	ร้อยละโดยปริมาตร	ร้อยละโดยน้ำหนัก	
Shell soil	8	7	5 – 7 - 9
Limestone screening	7	5	3 – 5 - 7
Red - dog	9	8	6 – 8 - 10
Shale or disintegrated shale	11	10	8 – 10 - 12
callche	8	7	5 – 7 - 9
cinders	8	8	6 – 8 - 10
chert	9	8	6 – 8 - 10
chat	8	7	5 – 7 - 9
marl	11	11	9 – 11 - 13
Scoria (containing + No.4 material)	12	11	9 – 11 - 13
Scoriea (minus No.4 material only)	8	7	5 – 7 - 9
Air – cooled slag	9	7	5 – 7 - 9
Water – cooled slag	10	12	10 – 12 - 14

ที่มา: Portland cement association (1959)

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Radwa Deflla Abdel Hafez และคณะ (2022) กล่าวว่าวัสดุก่อสร้างที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมกลายเป็นทางเลือกที่เป็นไปได้ในการรับมือกับความท้าทายด้านความยั่งยืนที่กำหนดโดยชุมชนโลก โดยไม่กระทบต่อข้อดีทางเทคนิค ของเสียจากอุตสาหกรรมเกษตรถูกนำมาใช้เป็นส่วนประกอบทางเลือกในการผลิตผลิตวัสดุก่อสร้างในแนวทางนี้อิฐดินเหนียวที่ถูกเผา เป็นหนึ่งในกลยุทธ์การกำจัดขยะแบบใหม่และใช้งานได้จริง ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงเน้นไปที่ผลกระทบจากของเสียจากอุตสาหกรรมเกษตร เช่น กากตะกอน, ตะกรันเหล็ก, ขี้เถ้าไม้ และขี้เถ้ากล้วย ในด้านกายภาพเครื่องกลต่าง ๆ และลักษณะโครงสร้างจุลภาคอิฐดินเหนียวที่ถูกเผา โดยการผสมของเสียในปริมาณร้อยละ5, 10, 15 และ 20 อิฐดินเหนียวที่ถูกเผาที่ผสมแบบไบนารี่ ถูกทำให้แห้งภายใต้แสงแดดเป็นเวลา 7 วันก่อนจะถูกเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง อิฐดินเหนียวที่ถูกเผา ที่ประกอบด้วย กากตะกอน, ขี้เถ้าไม้ และขี้เถ้า มีกำลังอัดต่ำกว่าตัวอย่างที่ผสมตะกรันเหล็ก ประมาณร้อยละ 67 ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีและการกระจายอนุภาคของวัสดุต้นทาง การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของอิฐดินเหนียวที่ถูกเผา ที่รวมเอาของเสียที่ต้องการปรับปรุงด้วยการเติมการตั้งต้นของเสียและควบคุมโดยอัตรา Ca /Si ผลลัพธ์เคยให้เห็นถึงความหนาแน่นที่ลดลง และการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ได้เห็นเมทริกซ์ที่ค่อนข้างกะทัดรัดของส่วนผสมที่ใช้ตะกรันเหล็ก ซึ่งมีแนวโน้มที่จะปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของอิฐดินเหนียวที่ถูกเผาให้ดีขึ้น

Fahmida munim ania และ Abdullah muhammad nahidb (2022) กล่าวว่า การดูดซึมน้ำของอิฐจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณร้อยละของเถ้าแกลบที่เพิ่มขึ้น อิฐดินเผาที่มีเถ้าแกลบร้อยละ 5 มีการดูดซึมน้ำต่ำสุดคือ ร้อยละ17.8 และสูงสุดคือ ร้อยละ21.33 สำหรับอิฐดินเผาที่มีเถ้าแกลบ ร้อยละ 20 นอกจากนี้ยังพบว่ากำลังอัดสูงสุดในบรรดาอิฐทุกประเภทคือ 8.401 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร สำหรับอิฐดินเผาที่ผสมเถ้าแกลบ ร้อยละ5 ในทำนองเดียวกันอิฐดินเผาที่มีเถ้าแก่ผสม ร้อยละ5 มีความหนาแน่นสูงสุดประมาณ 1,6076.395 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรและให้ค่าการนำความร้อน 0.584 วัตต์ต่อเมตร-เคลวิน (0.584 $W.m^{-1}K^{-1}$) อิฐดินเผาที่ผสมเถ้าแกลบทั้งหมด การศึกษายังเผยให้เห็นว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงที่มีนัยยะสำคัญในการหดตัวของอิฐที่ผสมเถ้าแกลบทั้งหมดร้อยละการหดตัวก็เท่าเดิม ซึ่งอยู่ที่ ร้อยละ14.28 จากการตรวจสอบพบว่าเถ้าแกลบ ร้อยละ5 อาจเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดเมื่อผสมดินเหนียวและสามารถใช้ทดแทนอิฐมวลเบาชั้น 1 และชั้น 2 และชั้น 3 ที่ใช้ก่อสร้างได้แต่ ผนังภายใน ฐานราก และโครงสร้างชั่วคราว ตามลำดับ

Bruno Ribeiro และคณะ (2020) กล่าวว่าการเติมเส้นใยชานอ้อย ร้อยละ 2.0 และผงชานอ้อยในคอนกรีต ร้อยละ 0.5 พบว่าความต้านทานแรงดัดและการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น อีกทั้งอุณหภูมิพื้นผิว และอัตราการระเหยของน้ำลดลง

ณฐพงศ์ จันทร์เพ็ชร (2562) ได้ทำการศึกษาและรวบรวมข้อมูลจากงานโครงงานที่เกี่ยวข้อง และได้อัตราส่วนผสมในการศึกษาทดลองอิฐมอญแบบไม่เผาด้วยฟางข้าวที่ผสมน้ำยางร้อยละ 0,2.5, 5, 7.5, 10 และ 12.5 โดยน้ำหนัก ปูนซีเมนต์, ดินลูกรังร้อยละ 6 โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์, น้ำร้อยละ 11.43 โดยน้ำหนักส่วนผสม และสารลดแรงตึงผิวร้อยละ 0.04 โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์

ผลการทำโครงงานพบว่าปริมาณน้ำยางที่เหมาะสมที่สุดในการทดลองครั้งนี้ คือ ใช้อัตราส่วนฟางข้าวต่อปูนซีเมนต์ร้อยละ 7.5 โดยน้ำหนัก ซึ่งเมื่อเทียบกับอิฐมอญตันทั่วไปแล้ว อิฐมอญที่ทำการศึกษาทดลองนั้นมีการพัฒนาคุณสมบัติทั้งทางกลและทางกายภาพได้ดีขึ้นโดยมีผลการพัฒนาคุณสมบัติด้านทางกล คือ กำลังอัดก้อนเดี่ยวเฉลี่ยที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 17 เมกกะปาสคาล ตามมาตรฐาน มอก.77-2545 ผ่านชั้นคุณภาพ ข, ค กำลังอัดปริซึมเฉลี่ยที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 6.13 เมกกะปาสคาล มีผลการพัฒนาคุณสมบัติด้านกายภาพคือ อัตราการดูดซึมน้ำเฉลี่ยที่อายุ 28 วัน เท่ากับร้อยละ 7.55 ตามมาตรฐาน มอก.77-2545 ผ่านชั้นคุณภาพ ก, ข, คความหนาแน่นเฉลี่ยที่อายุ 28 วันเท่ากับ 1,866 กิโลกรัมต่อลูกบาศเมตร, ค่าการนำความร้อน “K” ที่อายุ 28 วันเท่ากับ 0.0323 วัตต์ต่อเมตร-เคลวิน (0.323 W/m.K) และค่าต้านทานความร้อน “R”ที่อายุ 28 วันเท่ากับ 0.127 m^2.K/W

ภูษิต เลิศวัฒนารักษ์และคณะ (2550) กล่าวว่าผลของวัสดุทางธรรมชาติที่มีต่อคุณสมบัติของก้อนอิฐดินดิบสำหรับการก่อสร้างบ้านดิน งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของวัสดุทางการเกษตร ได้แก่ แกลบ และขุยมะพร้าว ที่มีต่อคุณสมบัติ ต่าง ๆ ของก้อนอิฐดินดิบ ได้แก่กำลังรับแรงอัด การหดตัว และการเป็นฉนวนกันความร้อน โดยใช้ดินเหนียว 2 ชนิดจากแหล่งที่ แตกต่างกันมาผลิตก้อนอิฐดินดิบ และใช้วัสดุทางการเกษตรดังกล่าวแทนที่ดินเหนียวในส่วนผสมของก้อนอิฐดินดิบในอัตราส่วน ร้อยละ 1, 2, 3, 6 และ 9 โดยน้ำหนัก เพื่อเปรียบเทียบกับก้อนอิฐดินดิบควบคุมซึ่งไม่มีส่วนผสมของวัสดุอื่น โดยก้อนอิฐที่ ขึ้นรูปเสร็จแล้วถูกนำมาทำให้แห้งด้วย 2 วิธีการคือ การตากแดดเป็นเวลา 7 วัน และการอบหลังจากตากแดดแล้วเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

จากผลการทดสอบพบว่า แกลบ และขุยมะพร้าว สามารถเพิ่มกำลังรับแรงอัด และลดการหดตัวของก้อนอิฐดินดิบ แต่ในส่วนผสมที่มีแกลบแทนที่เกินกว่าร้อยละ 3 นั้น ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดมีค่าลดลง และการอบก้อนอิฐในตู้อบทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น ผลจากการวิเคราะห์องค์ประกอบของดินเหนียวพบว่า ดินเหนียวชนิดที่ 2 มีปริมาณทรายมากกว่าซึ่งส่งผลให้ค่า กำลังรับแรงอัดสูงกว่าและการหดตัวต่ำกว่าก้อนอิฐที่ทำจากดินเหนียวชนิดที่ 1 และในด้านการนำความร้อนของก้อนอิฐพบว่า การแทนที่ดินเหนียวด้วยแกลบในส่วนผสมของก้อนอิฐดินดิบ ทำให้ค่าการนำความร้อนของก้อนอิฐต่ำลงเมื่อเทียบกับก้อนอิฐควบคุม แต่การแทนที่ดินเหนียวด้วยขุยมะพร้าวในส่วนผสมของก้อนอิฐดินดิบ ทำให้ค่าการนำความร้อนของก้อนอิฐเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับก้อนอิฐควบคุม เมื่อพิจารณาสัดส่วนผสมที่เหมาะสมทั้งในด้านคุณสมบัติเชิงกลและการเป็นฉนวนกันความร้อน พบว่า ก้อนอิฐที่ท้า

จากดินเหนียวชนิดที่ 2 ซึ่งผสมแกลบร้อยละ 3 มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 24.9 2 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ค่าการหดตัว เท่ากับร้อยละ 10.5 และค่าการนำความร้อน เท่ากับ 0.7 วัตต์ต่อเมตร เคลวิน และก้อนอิฐที่ทำจากดินเหนียวชนิดที่ 2 ซึ่งผสมขุยมะพร้าวร้อยละ 9 มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 29.2 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ค่าการหดตัว เท่ากับร้อยละ 6.2 และค่าการนำความร้อนเท่ากับ 0.9 วัตต์ต่อเมตร เคลวิน ผลจากงานวิจัยนี้บ่งชี้ว่า การใช้วัสดุทางธรรมชาติได้แก่ แกลบ และขุยมะพร้าว เป็นส่วนผสมในการผลิตก้อนอิฐดินดิบ ส่งผลในการเพิ่มความสามารถในด้านคุณสมบัติเชิงกล และการเป็นฉนวนกันความร้อนของก้อนอิฐดินดิบ ซึ่งเป็นโครงสร้างหลักของบ้านดินและเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาในการก่อสร้างบ้านดินให้เป็นสถาปัตยกรรมทางเลือกที่มีมาตรฐานและเป็นที่ยอมรับอย่าง กว้างขวางขึ้น

Cokca และคณะ (2004) ได้ศึกษาประสิทธิภาพของซีโอไลท์ธรรมชาติที่หาได้ในประเทศตุรกีในการปรับปรุงคุณสมบัติของดินขยายตัว (Expansive soil) เพื่อนำมาใช้เป็นวัสดุกั้นการรั่วซึมของหลุมฝังกลบ (Landfill barrier) โดยทำการผสมซีโอไลท์ในอัตราส่วนร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนักของดินแห้ง แล้วทดสอบสมบัติต่าง ๆ ได้แก่ ขีดจำกัดของ Atterberg, ค่าการขยายตัวอย่างอิสระ (Free swell) และกำลังรับแรงอัดไม่ถูกจำกัด (UCS) ผลการศึกษาพบว่าการผสมซีโอไลท์ช่วยลดค่าการขยายตัวของดิน และเพิ่มกำลังรับแรงอัดได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะในช่วงสัดส่วนร้อยละ 10 ถึง 15 ของซีโอไลท์ ซึ่งให้ผลลัพธ์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการนำไปใช้งานเป็นวัสดุปิดกั้นในระบบหลุมฝังกลบของเสีย

Murat Turkoz และ Pinar Vural (2012) ได้ศึกษาผลของซีเมนต์และสารเติมแต่งซีโอไลท์ธรรมชาติต่อดินเหนียวที่มีปัญหา ในการศึกษานี้ได้ทำการศึกษาผลของซีเมนต์และสารเติมแต่งซีโอไลท์ธรรมชาติต่อลักษณะการกระจายตัวและศักยภาพการบวมตัวของดินเหนียว ร้อยละซีเมนต์คงที่ (ร้อยละ 3) บวกกับร้อยละอายุของซีโอไลท์ธรรมชาติที่แตกต่างกัน (ร้อยละ1, 3, 6, 10, 15และ 20) ผสมกับตัวอย่างดินเหนียวที่แตกต่างกัน 4 ตัวอย่าง ในบริบทนี้อันดับแรก พิจารณาคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวอย่างดิน แล้วจะทำการทดสอบร้อยละการบวม ความละเอียด ความพรุน และกำลังรับแรงอัดแบบไม่จำกัดที่ระยะเวลาการบ่มที่แตกต่างกันกับตัวอย่างที่มีและไม่มีสารเติมแต่ง โดยการบีบอัดตัวอย่างเพื่อให้ได้ลักษณะเฉพาะของการบดอัดโดยเฉพาะค่าความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ขึ้นอยู่กับเวลาในการบ่ม และคุณสมบัติได้รับการปรับปรุงด้วยส่วนผสมของซีเมนต์และซีโอไลท์ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนการดูดซับโซเดียม และค่าร้อยละโซเดียมที่แลกเปลี่ยนได้ของตัวอย่างดินเหนียวที่มีลักษณะความเป็นพลาสติกที่แตกต่างกันจะแสดงคุณสมบัติการกระจายตัวและการบวมที่แตกต่างกันด้วย การศึกษานี้จึงไม่เพียงแต่จะแสดงให้เห็นว่าส่วนผสมของซีเมนต์และซีโอไลท์ช่วยปรับปรุงคุณสมบัติการกระจายและการบวมของตัวอย่างดินเหนียวที่มีลักษณะความเป็นพลาสติกที่

แตกต่างกันนั้นจะขึ้นอยู่กับค่าโซเดียมและร้อยละโซเดียมที่แลกเปลี่ยนได้ แต่ยังพบว่าค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญอีกด้วย

MohammadReza ShahriarKian และคณะ(2021) กล่าวว่า สามารถใช้ซีโอไลท์ผสมกับซีเมนต์เป็นสารเพิ่ม ความคงตัวเพื่อเพิ่มพฤติกรรมเชิงกลของดินได้ ตัวอย่างที่มีซีเมนต์และซีโอไลท์มีค่ากำลังอัดโดยการทดลองกำลังอัดแกนเดียวมากกว่าตัวอย่างที่มีซีเมนต์หรือซีโอไลท์เพียงอย่างเดียว การเติมซีโอไลท์มีผลสำคัญต่อการเพิ่มทั้งค่า กำลังอัดแกนเดียวและค่าความเครียดมากกว่าตัวอย่างที่ใช้ซีเมนต์ อย่างไรก็ตามเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดของชิ้นงานที่ทดสอบไม่ได้รับอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญจากการเพิ่มของปริมาณซีโอไลท์จากร้อยละ 3 เป็นร้อยละ 9 ค่ากำลังอัดแกนเดียวของชิ้นงานมีเสถียรภาพลดลง เมื่อจำนวนรอบการแช่แข็งและละลายเพิ่มตัวอย่างซีเมนต์มีความทนทานต่อการแช่แข็งและละลาย เมื่อปริมาณซีโอไลต์เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 3 เป็นร้อยละ 9 ชิ้นงานที่ทดสอบมีความเสถียรซึ่งมีซีเมนต์ร้อยละ 6 และซีโอไลท์ร้อยละ 9 มีความทนทานต่อการแช่แข็งและละลายสูงกว่าชิ้นงานทดสอบอื่นๆ

ทวีชัย สำราญวานิช (2560) ศึกษาความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์และกำลังอัดของคอนกรีตผสมซีโอไลท์สังเคราะห์ วัสดุประสานที่ใช้คือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และซีโอไลท์สังเคราะห์โดยใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนวัสดุประสานร้อยละ 1,3,5 และ10 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40, 0.50 และ 0.60 ทำการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต การแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งของคอนกรีตที่อายุ 7, 28, 56 และ 91 วัน และทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบแช่ในสารละลายเกลือคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 5.0 เป็นเวลา 28 วัน หลังจากผ่านการบ่มน้ำ 28 วัน

จากผลการทดลองพบว่าการใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนวัสดุประสานในคอนกรีตส่งผลกระทบต่อกำลังอัด และความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีต โดยเมื่อใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนวัสดุประสานในคอนกรีตมากขึ้นทำให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลงแต่การใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนวัสดุประสานร้อยละ 3 ทำให้คอนกรีตมีความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตมีค่าสูงสุดและการใช้ซีโอไลท์สังเคราะห์แทนวัสดุประสานในคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงช่วยปรับปรุงความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตได้กว่าที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำ

Sabet และคณะ (2013) ได้ศึกษาผลของการใช้วัสดุปอซโซลานเสริม ได้แก่ ซีโอไลท์ธรรมชาติ ซิลิกาฟูม และเถ้าลอย ต่อสมบัติคอนกรีตสมรรถนะสูงที่ไหลเข้าแบบได้เอง โดยทำการผสมวัสดุปอซโซลานในอัตราร้อยละ 10 และ 15 เพื่อแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน ผลการทดสอบพบว่า วัสดุผสมเสริมทั้งหมดช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลและความทนทานของคอนกรีต โดยเฉพาะซิลิกาฟูมที่ให้ค่ากำลังรับแรงอัดและความต้านทานต่อคลอไรด์สูงที่สุด อย่างไรก็ตาม ซีโอไลท์ธรรมชาติมีความโดดเด่นด้านต้นทุน ทำให้เป็นทางเลือกที่เหมาะสมในการพัฒนาคอนกรีตประสิทธิภาพสูงที่คุ้มค่าและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

Valipour et al. (2013) ได้ศึกษาความแข็งแรงคงทนของโครงสร้างคอนกรีตและอายุการใช้งานนั้นถูกแก้ไขปรับปรุงโดยการนำสารปอซโซลานมาใช้ในวงการอุตสาหกรรม ในการศึกษานี้จะใช้ปูนซีเมนต์ที่ผสมร้อยละ 10, 20 และ 30 ของซีโอไลท์ธรรมชาติ เปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ที่ผสมด้วยร้อยละ 5, 10 และ15 ของเมทาเคาลินและปูนซีเมนต์ที่ผสมด้วยร้อยละ 5, 7.5 และ 10 ของซิลิกาฟูม โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.35, 0.40, 0.45 และ 0.50 ซึ่งเปรียบเทียบในเรื่องกำลังอัด ความสามารถในการดูดซึมน้ำ ค่าสภาพดูดซึม ปริมาณช่องว่าง ความต้านทานไฟฟ้า การแทรกซึมของแก๊ส และการแทรกซึมคลอไรด์ จากการทดสอบแสดงว่า โดยทั่วไปซีโอไลท์นั้นจะด้อยกว่าซิลิกาฟูมและเมทาเคาลิน แม้ว่าซีโอไลท์สามารถใช้แทนที่สารปอซโซลานได้เพราะว่ามีคุณสมบัติความทนทานที่ดีกว่าและถูกกว่า และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมากกว่า

พหุน ปณ ฑิโต ชีเว

บทที่ 3
วิธีการศึกษา

ในบทนี้ จะอธิบายรายละเอียดของวิธีการศึกษาวิจัย ประกอบด้วย วัสดุ อัตราส่วนผสม เครื่องมือและอุปกรณ์ การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางเคมีของวัสดุ ขั้นตอนการทำอิฐมอญแบบไม่เผา การทดสอบคุณสมบัติของอิฐมอญ ซึ่งมีรายละเอียดตามลำดับดังนี้

3.1 วัสดุและอัตราส่วนผสม

1) ดินลูกรัง เป็นดินที่ใช้ในการผลิตบล็อกประสานในจังหวัดกาฬสินธุ์ ซึ่งแหล่งดินอยู่ในเขตอำเภอเมือง จังหวัดกาฬสินธุ์ มีสีส้มดังภาพประกอบที่ 16 นำมาร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 16 และอบให้แห้งสนิท

ภาพประกอบ 16 ดินลูกรังที่ใช้ในการผลิตอิฐประสาน

2) ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก

3) ซีโอไลท์ที่ผ่านการใช้งานแล้วโดยเป็นซีโอไลท์ที่นำไปใช้ดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในกระบวนการผลิตไนโตรเจนเหลว มีลักษณะเป็นเม็ดกลมสีขาวดังภาพประกอบที่ 17 นำมาบดให้ละเอียดจนมีปริมาณค้างบนตะแกรงเบอร์ 200 ไม่เกินร้อยละ 5 ซึ่งมีความถ่วงจำเพาะ 2.015

ภาพประกอบ 17 ซีโอไลท์ที่ผ่านการใช้งานในกระบวนการผลิตไนโตรเจนเหลว

ตาราง 11 อัตราส่วนผสม

ที่	สัญลักษณ์	สัดส่วนของวัสดุโดยน้ำหนัก			
		ปูนซีเมนต์	ดิน	ซีโอไลท์	น้ำ : วัสดุประสาน
1	Z0	1.0	6	0	0.7
2	Z0.1	0.9	6	0.1	0.7
3	Z0.2	0.8	6	0.2	0.7
4	Z0.3	0.7	6	0.3	0.7
5	Z0.4	0.6	6	0.4	0.7
6	Z0.5	0.5	6	0.5	0.7
7	Z0.6	0.4	6	0.6	0.7

หมายเหตุ: ปริมาณน้ำต่อวัสดุประสานกำหนดไว้ในเบื้องต้นเท่านั้น ในการอัดขึ้นรูปจริงจะปรับปริมาณน้ำไปเรื่อย ๆ จนได้ปริมาณที่พอดีต่อการอัดขึ้นรูป

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

1) เครื่องอัดขึ้นรูปอิฐ เป็นแบบมือโยก สามารถอัดขึ้นรูปได้ครั้งละ 4 ก้อน โดยมีขนาดแต่ละก้อนเท่ากับ 6.5 x 14 x 4 ลูกบาศก์เซนติเมตร ดังภาพประกอบที่ 18

ภาพประกอบ 18 เครื่องอัดขึ้นรูปอิฐมอญ

2) เครื่องทดสอบการนำความร้อน สำหรับวัดค่าการนำความร้อนของก้อนอิฐ

3) เวอร์เนียร์คาลิปเปอร์ สำหรับวัดขนาด (ความกว้าง ความยาว และความหนา) ของก้อนอิฐ

4) เครื่องชั่งดิจิตอล สำหรับตวงส่วนผสมให้เป็นไปตามที่กำหนด

5) แผ่นพลาสติกใส สำหรับห่อก้อนอิฐเพื่อทำการบ่ม

6) ชุดตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 10 20 40 60 100 และ 200 เพื่อทดสอบการกระจายขนาดของวัสดุ

7) ชุดทดสอบพิกัดเหลว

8) ชุดทดสอบพิกัดพลาสติก

3.3 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางเคมีของวัสดุ

ทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของดินดังนี้

1) การกระจายขนาดโดยวิธีร่อนตะแกรง ใช้ตะแกรงเบอร์ 4 10 20 40 60 100 และ 200 โดยทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D422-63

2) พิกัดอัตเตอร์เบอร์ก (พิกัดเหลวและพิกัดพลาสติก) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D4318

3) ความถ่วงจำเพาะ ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D854

4) ทำการจำแนกชนิดของดินตามระบบ Unified Soil Classification System (USCS)

ทดสอบคุณสมบัติทางเคมีของซีโอไลท์ดังนี้

1) การวิเคราะห์องค์ประกอบและโครงสร้างผลึกด้วยวิธี X-ray Diffraction (XRD)

2) ถ่ายภาพขยายกำลังสูงโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็คตรอนแบบส่องกราด (SEM)

3) การวิเคราะห์หาปริมาณธาตุด้วยเครื่อง Elemental Analyzer

4) การวิเคราะห์หาความเข้มข้นของธาตุ X-ray fluorescence (XRF)

3.4 ขั้นตอนการทำอิฐมอญแบบไม่เผา

1) ผสมวัสดุตามอัตราส่วนที่กำหนดจนเป็นเนื้อเดียวกัน

2) ตวงส่วนผสมให้มีน้ำหนักที่กำหนดเพื่อให้ก้อนอิฐมีความหนาแน่นตามต้องการ (ประมาณ 1800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) โดยตัวอย่างอิฐทุกก้อนมีการควบคุมน้ำหนักให้เท่ากัน

3) เทส่วนผสมลงในแบบอัดของเครื่องอัดแบบมือโยก โดยมีจำนวน 4 ช่อง แต่ละช่องอัดก้อนอิฐได้ 1 ก้อน โดยจะได้ก้อนอิฐขนาด 6.5 ซม. x 14 ซม. x 4 ซม.

4) อัดส่วนผสมโดยโยกก้านของเครื่องอัดให้สุด

5) ดันส่วนผสมออกจากแบบ จะได้ก้อนอิฐดังภาพประกอบ 3.4

6) นำก้อนอิฐวางพักไว้ในที่ร่มเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

7) ทำการบ่มก้อนอิฐโดยฉีดพรมน้ำให้ทั่วและคลุมด้วยพลาสติก ดังภาพประกอบที่ 19 และ 20

ภาพประกอบ 19 ลักษณะของก้อนอิฐที่อัดขึ้นรูป

ภาพประกอบ 20 การห่อก้อนอิฐด้วยพลาสติกเพื่อทำการบ่ม

3.5 การทดสอบอิฐมอญแบบไม่เผา

1) การทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุ 7 14 และ 28 วัน ตามมาตรฐาน มอก.243-2520

2) การทดสอบโมดูลัสแตกร้าวที่อายุ 28 วัน ตามมาตรฐาน มอก.243-2520

3) การทดสอบการดูดซึมน้ำที่อายุ 28 วัน ตามมาตรฐาน มอก.243-2520

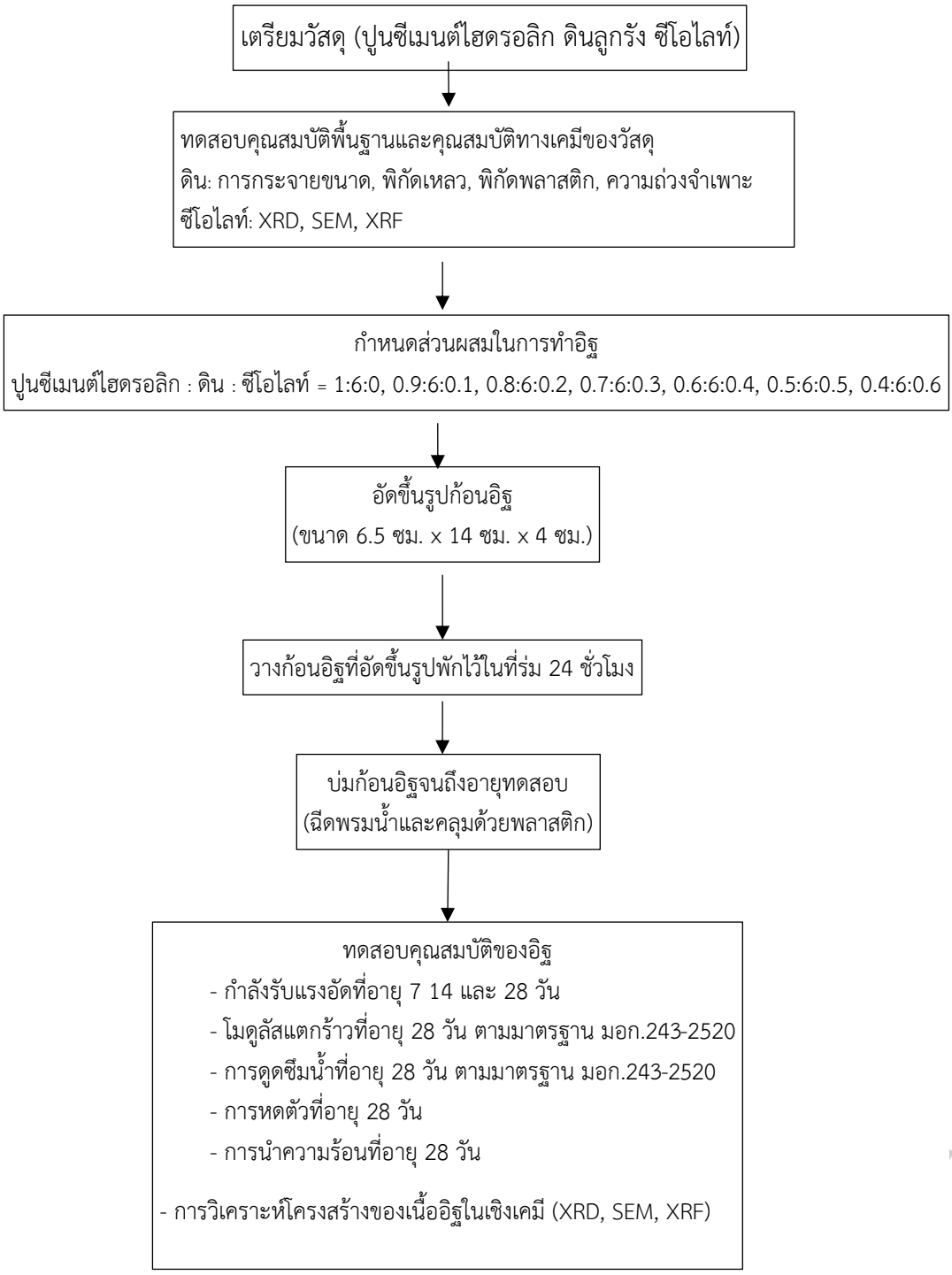
4) การทดสอบการหดตัวที่อายุ 28 วัน โดยเป็นการหาร้อยละความแตกต่างของขนาด (ความกว้าง ความยาว ความหนา) หลังจากอัดเสร็จใหม่กับหลังจากผ่านไป 28 วัน

5) การทดสอบการนำความร้อนที่อายุ 28 วัน

6) การวิเคราะห์โครงสร้างของเนื้ออิฐในเชิงเคมี ได้แก่ XRD, SEM, Element Analysis, XRF

วิธีการศึกษาวิจัยสามารถสรุปเป็นแผนผังได้ดังภาพประกอบที่ 21

พหุน ปณ ฑิโต ชีเว



ภาพประกอบ 21 แผนผังสรุปขั้นตอนการศึกษาวิจัย

บทที่ 4
ผลทดลองและการวิเคราะห์

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาและประเมินคุณสมบัติของอิฐมอญแบบไม่เผาที่ผสมซีโอไลท์เหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตไนโตรเจนเหลว โดยวิเคราะห์ผลกระทบของซีโอไลท์ต่อคุณสมบัติทางกายภาพและทางวิศวกรรมของอิฐมอญแบบไม่เผาที่ผสมซีโอไลท์ รวมถึงการเปรียบเทียบกับมาตรฐาน เพื่อสรุปข้อดีและข้อจำกัดของการใช้ซีโอไลท์ในวัสดุก่อสร้าง

บทนี้จะนำเสนอผลการทดลองทั้งหมด พร้อมการวิเคราะห์และอภิปรายถึงผลกระทบของซีโอไลท์ต่อคุณสมบัติของอิฐมอญแบบไม่เผาที่ผสมซีโอไลท์ เพื่อสรุปข้อดีและข้อจำกัดของการใช้ซีโอไลท์เหลือทิ้งในการพัฒนาอิฐมอญแบบไม่เผาที่ผสมซีโอไลท์ รวมถึงผลลัพธ์ที่อาจเป็นแนวทางสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในเชิงพาณิชย์หรือการพัฒนางานวิจัยในอนาคต

4.1. ผลการทดสอบ XRF (X-ray Fluorescence) และการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี

จากการวิเคราะห์ด้วยวิธี X-ray fluorescence (XRF) ซึ่งจะเห็นได้ว่าองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก ดินลูกรัง และซีโอไลท์ สารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก คือ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) และซิลิกา (SiO2) ส่วนสารประกอบหลักในซีโอไลท์ คือ ซิลิกา (SiO2) และอลูมินา (Al2O3) แสดงตารางที่ 12

ตาราง 12 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก ซีโอไลท์ ดินลูกรัง อิฐที่ผสมซีโอไลท์ และอิฐที่ไม่ผสมซีโอไลท์ จากการวิเคราะห์ด้วยวิธี X-ray fluorescence (XRF)

สารประกอบ	ร้อยละโดยมวล				
	ปูนซีเมนต์ไฮดรอกลิก	ซีโอไลท์	ดินลูกรัง	อิฐมอญแบบไม่เผาที่ผสมซีโอไลท์ร้อยละ 20	อิฐมอญแบบไม่เผาที่ไม่ผสมซีโอไลท์
CaO	59.230	0.685	0.059	13.708	15.958
SiO_2	23.980	57.912	79.196	66.794	65.211
Al_2O_3	4.467	27.799	17.788	14.58	13.579
Fe_2O_3	3.187	0.992	2.084	2.749	2.932
SO_3	5.125	0.225	-	1.142	1.336

ตาราง 13 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก ซีโอไลท์ ดินลูกรัง อิฐที่ผสมซีโอไลท์ และอิฐที่ไม่ผสมซีโอไลท์ จากการวิเคราะห์ด้วยวิธี X-ray fluorescence (XRF) (ต่อ)

สารประกอบ	ร้อยละโดยมวล				
	ปูนซีเมนต์ไฮดรอกลิก	ซีโอไลท์	ดินลูกรัง	อิฐมอญแบบไม่เผาที่ผสมซีโอไลท์ร้อยละ 20	อิฐมอญแบบไม่เผาที่ไม่ผสมซีโอไลท์
K_2O	0.402	0.161	0.087	0.181	0.177
MgO	2.813	-	-	-	-
Na_2O	-	11.995	-	-	-

จากข้อมูลในตารางสามารถสังเกตได้ว่า ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) สูงที่สุด คิดเป็นร้อยละ 59.23 ในขณะที่ซีโอไลท์มีปริมาณซิลิกา (SiO2) และอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al2O3) สูงถึงร้อยละ 57.91 และ ร้อยละ 27.80 ตามลำดับ ซึ่งเป็นคุณสมบัติสำคัญของวัสดุปอซโซลาน

สำหรับดินลูกรังองค์ประกอบหลักคือซิลิกา (SiO2) ซึ่งมีค่าสูงถึงร้อยละ79.20 รองลงมาคืออะลูมิเนียมออกไซด์ (Al2O3) ร้อยละ 17.79 แสดงถึงลักษณะของวัสดุที่มีปริมาณดินเหนียวสูงและมีแร่ธาตุประกอบในสัดส่วนที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตอิฐ

เมื่อพิจารณาอิฐมอญแบบไม่เผาที่ผสมซีโอไลท์ร้อยละ 20 พบว่าองค์ประกอบของซิลิกา (SiO2) มีค่าสูงขึ้นเป็นร้อยละ 66.79 เมื่อเทียบกับอิฐมอญแบบไม่เผาที่ไม่ผสมซีโอไลท์ซึ่งมีค่าร้อยละ 65.21 และมีปริมาณอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al2O3) สูงขึ้นเช่นกัน แสดงให้เห็นถึงผลกระทบของซีโอไลท์ที่เติมลงไปในการปรับปรุงองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ ส่วนปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ของอิฐมอญแบบไม่เผาที่ผสมซีโอไลท์มีค่าต่ำกว่าอิฐมอญแบบไม่เผาที่ไม่ผสมซีโอไลท์ (ร้อยละ 13.71 เทียบกับ ร้อยละ 15.96) ซึ่งอาจมีผลต่อปฏิกิริยาไฮเดรชันและคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ

4.2 ผลการทดสอบ XRD (X-ray Diffraction) และการวิเคราะห์โครงสร้างผลึก

ในการศึกษาคุณสมบัติของ ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก ซีโอไลท์ และดินลูกรัง โดยการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค X-ray Diffraction (XRD) จะช่วยระบุองค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างผลึกของวัสดุเหล่านั้น ผลการวิเคราะห์ XRD ช่วยให้เข้าใจบทบาทของสารประกอบต่าง ๆ ต่อ

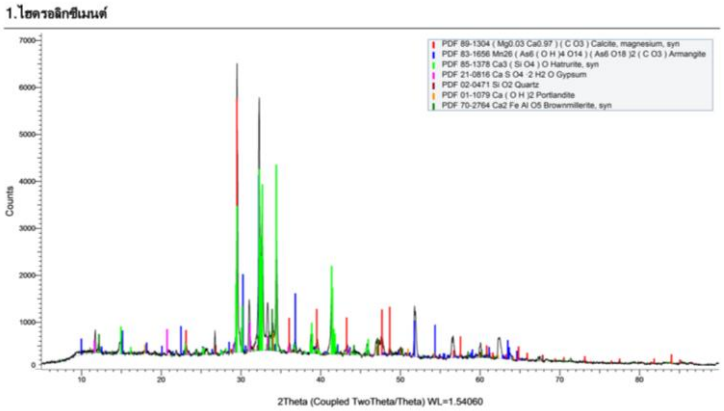
คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของวัสดุ ดังตารางที่ 13 เป็นตารางสรุปสารประกอบหลักที่พบในการทดสอบ XRD ของวัสดุต่าง ๆ พร้อมบทบาทและคุณสมบัติที่สำคัญของแต่ละสารประกอบ

1) ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก จากการวิเคราะห์ผล XRD ดังภาพประกอบที่ 23 พบว่าปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกมีองค์ประกอบแร่ที่สำคัญ ได้แก่ ไตรแคลเซียมซิลิเกต (Ca3SiO5) ซึ่งเป็นแร่ที่เกี่ยวข้องโดยตรงกับไตรแคลเซียมซิลิเกต (C3S) ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และมีบทบาทสำคัญในการให้กำลังรับแรงอัดในช่วงต้นของปูนซีเมนต์ เนื่องจากมีปฏิกิริยาไฮเดรชันที่รวดเร็วและให้ผลผลิตเป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)2) และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ซึ่งเป็นตัวกำหนดอัตราการเกิดความแข็งแรงของซีเมนต์ในช่วง 7 วันแรก นอกจากนี้ยังพบ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)2) ซึ่งเป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาของไตรแคลเซียมซิลิเกต (C3S) และไดแคลเซียมซิลิเกต (C2S) ซึ่งอาจเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานเมื่อทำปฏิกิริยากับวัสดุปอซโซลาน เช่น ซิลิกาฟูม หรือเถ้าลอย เพื่อเพิ่มความทนทานของซีเมนต์

นอกจากนี้ยังพบ ยิปซัม (CaSO4·2H2O) ซึ่งถูกเติมลงในกระบวนการผลิตซีเมนต์เพื่อควบคุมปฏิกิริยาของไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C3A) และป้องกันการเกิด Flash set ซึ่งเป็นการแข็งตัวเร็วเกินไป โดยทำหน้าที่ชะลอปฏิกิริยาไฮเดรชันของอลูมิเนตเพื่อให้มีเวลาทำงานที่เหมาะสม ส่วน ไดแคลเซียมเฟอร์ไรต์อะลูมิเนต (Ca2FeAlO5) ซึ่งเป็นแร่ที่สัมพันธ์กับเตตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรต์ (C4AF) มีบทบาทในการกำหนดสีของปูนซีเมนต์และเพิ่มความทนทานต่อซัลเฟต โดยไม่ส่งผลกระทบต่อกำลังรับแรงอัดมากนัก แต่มีส่วนช่วยในการปรับปรุงสมบัติทางเคมีของซีเมนต์

ในส่วนของแร่ที่มาจากวัตถุดิบตั้งต้นพบแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO3) ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่พบในวัตถุดิบตั้งต้น เช่น หินปูน และอาจเกิดขึ้นจากกระบวนการคาร์บอเนชันของแคลเซียมไฮดรอกไซด์เมื่อสัมผัสกับ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO2) ในอากาศ โดยมีผลต่อการลดค่าความพรุนของซีเมนต์ ส่งผลต่อความต้านทานต่อสารเคมีภายนอก และพบควอตซ์ (SiO2) ซึ่งเป็นแร่ที่พบในวัตถุดิบ เช่น ทราย หรือซิลิกา และมีบทบาทในการปรับปรุงความแข็งแรงของโครงสร้างจุลภาค โดยในบางกรณี ซิลิกาอาจทำปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์ของแคลเซียมเพื่อสร้างสารไฮเดรตที่เพิ่มความแข็งแรงของซีเมนต์

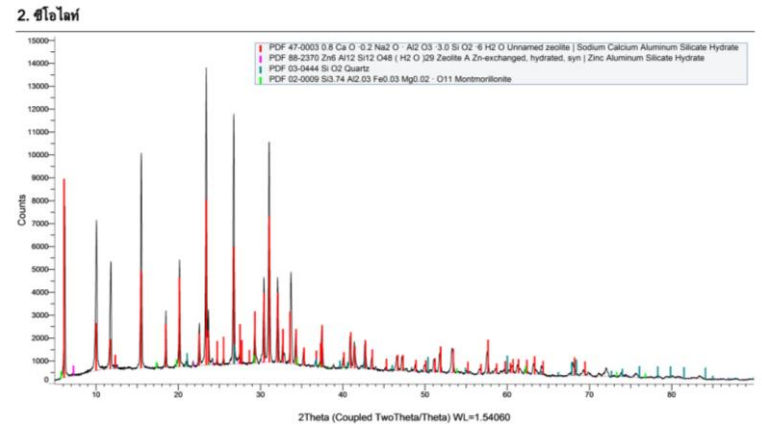
นอกจากนี้ยังพบแร่รองในปริมาณน้อย เช่น อาร์มานไจต์ (Mn26(As6(OH)4O14)(As6O18)2(CO3)) ซึ่งอาจเกิดขึ้นจากองค์ประกอบของแร่ธาตุที่เป็นสิ่งเจือปนในวัตถุดิบ และอาจมีผลกระทบต่อสีของซีเมนต์หรือคุณสมบัติพิเศษบางประการ เช่น ความต้านทานต่อสภาพแวดล้อมที่เป็นกรด



ภาพประกอบ 22 ผลการทดสอบ XRD ของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก

กล่าวโดยสรุป ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกมีองค์ประกอบแร่ที่สำคัญ ได้แก่ ไตรแคลเซียมซิลิเกต (C3S) แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)2), ยิปซัม (CaSO4·2H2O), เตตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอไรต์ (C4AF) แคลเซียมคาร์บอเนต(CaCO3) ซิลิคอนไดออกไซด์หรือที่รู้จักกันทั่วไปในชื่อ ควอตซ์ (SiO2) และแร่รองอื่น ๆ เช่น อาร์มานไจต์ ซึ่งแต่ละองค์ประกอบมีบทบาทสำคัญต่อพฤติกรรมทางเคมีและคุณสมบัติทางกลของซีเมนต์ โดยเฉพาะ C3S และ C2S ที่มีผลโดยตรงต่อการพัฒนากำลังรับแรงอัดของซีเมนต์ ในขณะที่ยิปซัมและพอร์ตแลนไดต์มีบทบาทสำคัญในการควบคุมปฏิกิริยาไฮเดรชันและรักษาความเสถียรของซีเมนต์ ส่วนแคลไซต์และควอตซ์มีผลต่อโครงสร้างจุลภาคและความทนทานของวัสดุ

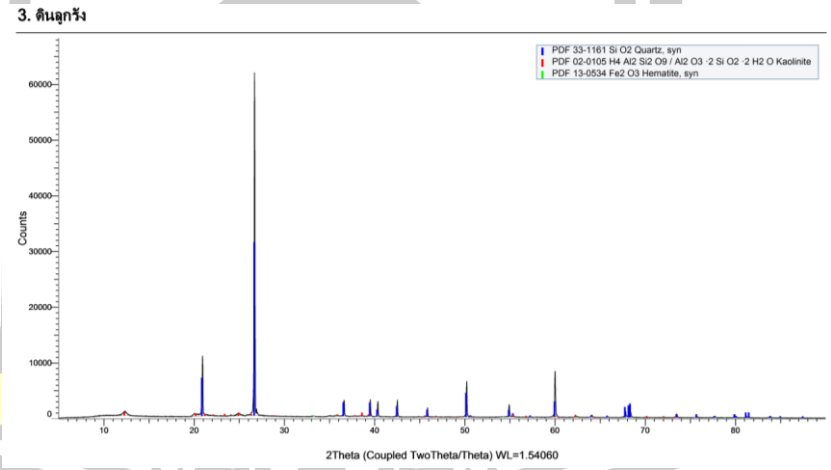
2) ซีโอไลท์ โครงสร้างผลึกของซีโอไลท์ที่ได้จากการทดสอบ XRD แสดงดังภาพประกอบที่ 23 ซึ่งพบว่าเป็นวัสดุที่มีโครงสร้างผลึกที่เป็นระเบียบ โดยพบเฟสหลักของแร่ในกลุ่ม Clinoptilolite และ Mordenite ซึ่งเป็นซีโอไลท์ประเภทหนึ่งที่มีโครงสร้างรูพรุนสูง และสามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้ดี



ภาพประกอบ 23 ผลการทดสอบ XRD ซีโอไลท์

องค์ประกอบเหล่านี้มีบทบาทสำคัญต่อคุณสมบัติของอิฐมอญแบบไม่เผาที่ผสมซีโอไลท์ โดยช่วยเพิ่มความแข็งแรงของวัสดุเนื่องจากสามารถสร้างพันธะกับปูนซีเมนต์ได้ดี ผล XRD ยังแสดงให้เห็นว่าซีโอไลท์มีปริมาณ ซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) สูง ซึ่งซิลิกา (SiO_2) ทำปฏิกิริยาปอซโซลานกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ สร้างแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ซึ่งเป็นเจลที่ช่วยให้คอนกรีตมีความแข็งแรงและทนทานมากขึ้น เนื่องจากอนุภาคของซิลิกา (SiO_2) มีขนาดเล็กจึงช่วยเติมเต็มช่องว่างในเนื้อคอนกรีตทำให้คอนกรีตแน่นและลดการซึมผ่านของน้ำได้ดี ส่วนอะลูมินา (Al_2O_3) จะมีบทบาทร่วมกับซิลิกาในปฏิกิริยาปอซโซลานช่วยเพิ่มความแข็งแรงระยะยาว

3) ดินลูกรัง ผลการทดสอบ X-ray Diffraction (XRD) ของดินลูกรังแสดงดังภาพประกอบที่ 24 ซึ่งจะเห็นว่าโครงสร้างผลึกหลักของวัสดุประกอบด้วย ควอตซ์ (SiO_2), เคโอลิไนต์ ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$) และ เฮมาไทต์ (Fe_2O_3) ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญที่ส่งผลต่อคุณสมบัติของอิฐที่ผลิตจากดินลูกรัง โดย ควอตซ์ เป็นองค์ประกอบหลักที่พบในปริมาณสูงและมีบทบาทสำคัญต่อความแข็งแรงและความทนทานของวัสดุ



ภาพประกอบ 24 ผลการทดสอบ XRD ดินลูกรัง

อย่างไรก็ตาม เนื่องจาก ควอตซ์ เป็นผลึกแข็งที่ไม่มีคุณสมบัติในการยึดเกาะอาจทำให้โครงสร้างของอิฐเปราะหากไม่มีสารประสานเสริม เช่น ปูนซีเมนต์หรือซีโอไลท์ ในขณะที่ เคโอลิไนต์เป็นแร่ดินเหนียวที่ช่วยเพิ่มความสามารถในการจับตัวของดินและสามารถเกิดปฏิกิริยากับสารละลาย

ด่างในปฏิกิริยาไฮเดรชันได้ดี ส่งผลให้โครงสร้างของอิฐมอญแบบไม่เผาที่ผสมซีโอไลท์มีความหนาแน่นมากขึ้น

ตาราง 14 สรุปสารประกอบหลักที่พบในการทดสอบ XRD ของวัสดุ

วัสดุ	สารประกอบ	บทบาทและคุณสมบัติ
ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก	ไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S, Ca_3SiO_5)	- พัฒนากำลังรับแรงอัดในช่วงต้น - เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันเร็ว เกิดเป็น C-S-H และ $Ca(OH)_2$
	พอร์ตแลนไดต์ ($Ca(OH)_2$)	- รักษาค่า pH สูง (>12.5) ป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กเสริม - อาจเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกกับวัสดุปอซโซลาน
	ยิปซัม ($CaSO4\cdot_2H_2O$)	- ควบคุมปฏิกิริยาของ C_3A และป้องกันการแข็งตัวเร็วเกินไป - ชะลอปฏิกิริยาไฮเดรชันของอลูมิเนต
	เตตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรต์ (C_4AF, Ca_2FeAlO_5)	- กำหนดสีของปูนซีเมนต์ - เพิ่มความทนทานต่อซัลเฟต
	แคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$)	- พบในวัตถุดิบตั้งต้น เช่น หินปูน - ลดความพรุนและเพิ่มความต้านทานต่อสารเคมี
	ควอตซ์ (SiO_2)	- ปรับปรุงความแข็งแรงของโครงสร้างจุลภาค - อาจทำปฏิกิริยากับ $Ca(OH)_2$ เพื่อสร้าง C-S-H
	อาร์มานไจต์ ($Mn_{26}(As_6(OH)_4O_{14})(As_6O_{18})_2$ (CO_3))	- อาจส่งผลต่อสีหรือคุณสมบัติพิเศษ เช่น ความต้านทานต่อสภาพแวดล้อมที่เป็นกรด
ซีโอไลท์	Clinoptilolite และ Mordenite (ซีโอไลท์ประเภทหนึ่ง)	- โครงสร้างรูพรุนสูงและสามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้ดี - เพิ่มความแข็งแรงของวัสดุโดยสร้างพันธะกับปูนซีเมนต์ - เป็นฉนวนความร้อนที่ดี
	SiO_2 และ Al_2O_3	- ปรับปรุงคุณสมบัติทางกลของวัสดุ - ช่วยเสริมโครงสร้างของอิฐ

ตาราง 15 สรุปสารประกอบหลักที่พบในการทดสอบ XRD ของวัสดุ (ต่อ)

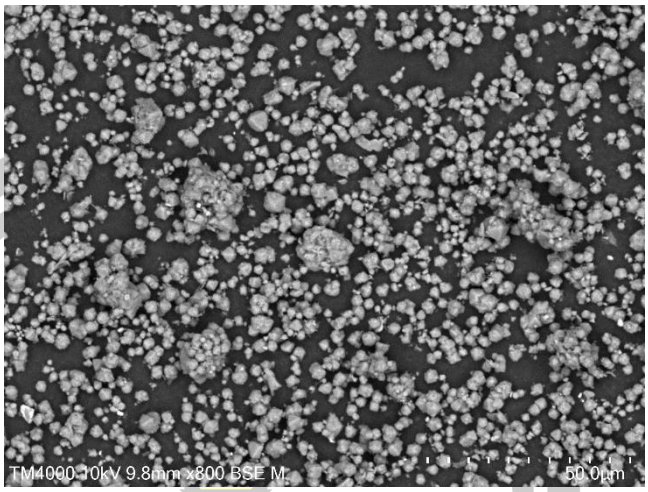
วัสดุ	สารประกอบ	บทบาทและคุณสมบัติ
ดินลูกรัง	ควอตซ์ (SiO_2)	- เป็นองค์ประกอบหลักที่เพิ่มความแข็งแรงและความทนทาน - ไม่มีคุณสมบัติในการยึดเกาะ ทำให้วัสดุเปราะหากไม่มีสารประสานเสริม
	เคโอลิไนต์ ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$)	- เพิ่มความสามารถในการจับตัวของดิน - เกิดปฏิกิริยากับสารละลายด่างในปฏิกิริยาไฮเดรชัน ส่งผลให้โครงสร้างมีความหนาแน่นมากขึ้น
	เฮมาไทต์ (Fe_2O_3)	- ส่งผลต่อสีและความแข็งแรงของวัสดุ

4.3 การทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

การศึกษาลักษณะโครงสร้างจุลภาคของวัสดุก่อสร้างมีความสำคัญอย่างยิ่งในการทำความเข้าใจคุณสมบัติทางกายภาพและทางกลของวัสดุ เนื่องจากโครงสร้างภายใน เช่น ความพรุน การกระจายตัวของวัสดุผสม หรือการยึดเกาะขององค์ประกอบต่าง ๆ มีผลต่อสมรรถนะโดยรวมของวัสดุในเชิงวิศวกรรม งานวิจัยนี้จึงได้นำกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM) มาใช้ในการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวและโครงสร้างจุลภาคของอิฐมอญแบบไม่เผาที่ผสมซีโอไลท์ในอัตราส่วนต่าง ๆ

การทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ช่วยให้สามารถสังเกตเห็นรูพรุน ขนาดอนุภาค และการจัดเรียงตัวของเนื้อวัสดุได้อย่างชัดเจน ซึ่งข้อมูลเหล่านี้จะช่วยสนับสนุนการอธิบายผลการทดสอบสมบัติต่าง ๆ เช่น ความหนาแน่น การดูดซึมน้ำ หรือค่าการนำความร้อน และสามารถนำไปใช้ในการปรับปรุงสูตรผสมหรือกรรมวิธีการผลิตอิฐมอญแบบไม่เผาที่ผสมซีโอไลท์ให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

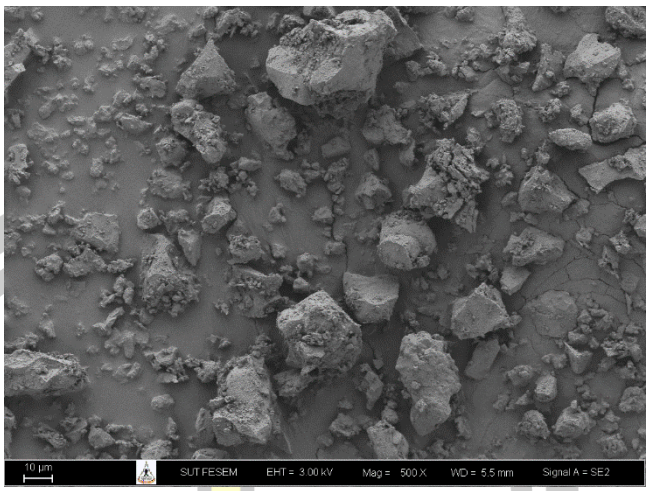
1) ซีโอไลท์ จากการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าซีโอไลท์ธรรมชาติที่ใช้ในงานวิจัยมีโครงสร้างรูพรุนอย่างชัดเจน โดยลักษณะพื้นผิวปรากฏเป็นผลึกที่มีรอยแตกละเอียดและช่องว่างจำนวนมาก กระจายตัวไม่สม่ำเสมอ ซึ่งแสดงถึงลักษณะเฉพาะของซีโอไลท์ชนิดคลิโนปทิโลไลต์ (Clinoptilolite) ที่มีโครงสร้างผลึกแบบสามมิติและมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง ดังภาพประกอบที่ 25 ลักษณะรูพรุนเหล่านี้มีความสำคัญต่อสมบัติของวัสดุผสมในงานวิศวกรรม เช่น การดูดซับน้ำ และการปลดปล่อยน้ำอย่างช้า ๆ ซึ่งส่งผลต่อกระบวนการบ่มของปูนซีเมนต์ในระยะยาว (Internal curing)



ภาพประกอบ 25 ภาพถ่าย SEM ของซีโอไลท์

อย่างไรก็ตามซีโอไลท์จะไม่เกิดการพองตัวหรือหดตัวอย่างมีนัยสำคัญระหว่างการดูดซับหรือคายความชื้น จึงคงโครงสร้างเชิงมิติได้ดี และไม่ส่งผลให้เกิดรอยร้าวภายในวัสดุผสม คุณสมบัติเด่นนี้จึงเอื้อประโยชน์ต่อการเสริมกำลังและความทนทานของวัสดุก่อสร้าง โดยเฉพาะเมื่อใช้ซีโอไลท์ในสัดส่วนที่เหมาะสมร่วมกับปูนซีเมนต์ จะช่วยให้เกิดการพัฒนาเจลแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) เพิ่มเติมจากปฏิกิริยาปอซโซลาน และลดการเกิดรูพรุนขนาดใหญ่ในโครงสร้างเนื้อวัสดุ

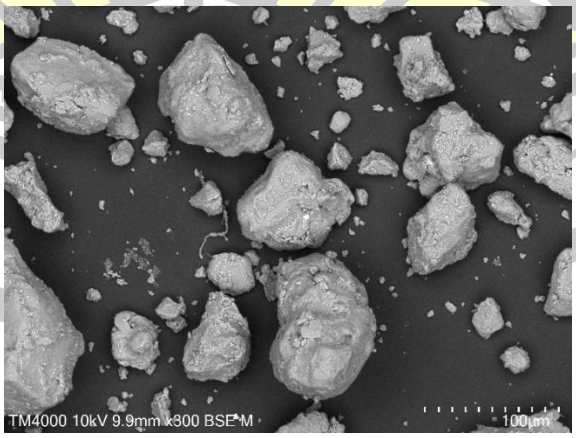
2) ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก จากการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าผงปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกมีลักษณะเป็นอนุภาคแข็งที่มีรูปร่างไม่สม่ำเสมอ มีความคมของขอบอนุภาค และขนาดของอนุภาคมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน (Heterogeneous particles) ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ประกอบด้วยแร่หลักหลายชนิด บางอนุภาคแสดงลักษณะเป็นแผ่นหรือผลึกเหลี่ยมซึ่งอาจเป็นผลึกของไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) หรือ ไดแคลเซียมซิลิเกต (C_2S) ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักที่ทำปฏิกิริยาไฮเดรชันเมื่อสัมผัสกับน้ำ นอกจากนี้ยังมีโอกาสพบอนุภาคที่มีพื้นผิวหยาบ ซึ่งอาจเป็นแร่ไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3A) และ เตตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรต์ (C_4AF) ลักษณะของผงปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกในภาพยังแสดงให้เห็นถึงความพรุนบางส่วนตามผิวของอนุภาค ซึ่งเป็นผลจากกระบวนการบดละเอียด (Grinding) ทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสสูง เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีอย่างรวดเร็วเมื่อนำไปผสมกับน้ำดังภาพประกอบที่ 26



ภาพประกอบ 26 ภาพถ่าย SEM ของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก

3) ดินลูกรัง จากภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของดินที่ใช้ในงานวิจัย ซึ่งได้มาจากพื้นที่จังหวัดกาฬสินธุ์ พบว่าลักษณะของเนื้อดินมีองค์ประกอบที่เป็นแผ่นและอนุภาคที่จับตัวกันอย่างหลวม ๆ ซึ่งแสดงถึงคุณสมบัติของดินเหนียว (Clay-rich soil) ที่มีโครงสร้างละเอียดและมีความสามารถในการอุ้มน้ำสูง

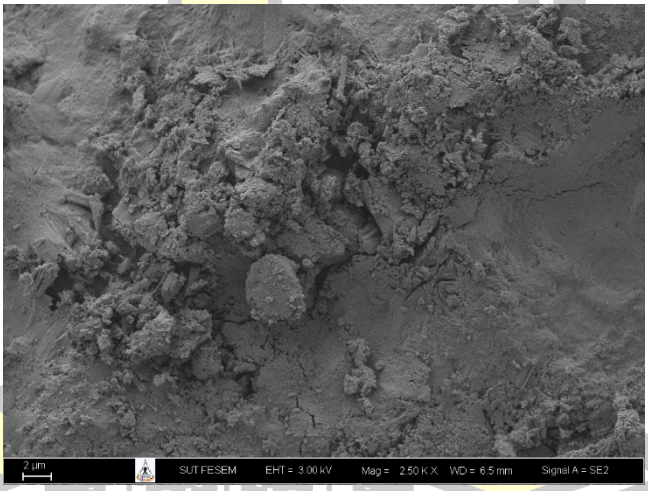
พื้นผิวของดินแสดงให้เห็นถึงความไม่สม่ำเสมอ และมีร่องรอยของโพรงและรอยแตกเล็ก ๆ กระจายตัวอยู่ทั่วไปดังภาพประกอบที่ 27 ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของดินที่มีอนุภาคขนาดเล็กและมีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยากับสารปรับปรุง เช่น ซีโอไลท์หรือปูนซีเมนต์ เมื่อเปรียบเทียบกับดินทั่วไป ลักษณะของผิวดินดังกล่าวอาจส่งผลดีต่อการยึดเกาะของซีโอไลท์ในกระบวนการผลิตอิฐมอญแบบไม่เผาที่ผสมซีโอไลท์



ภาพประกอบ 27 ภาพถ่าย SEM ของดินลูกรัง

โดยภาพรวม โครงสร้างที่ปรากฏในภาพ SEM บ่งชี้ว่าดินดังกล่าวมีศักยภาพในการนำไปใช้เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตอิฐ เนื่องจากมีลักษณะอนุภาคที่สามารถปรับแต่งได้ด้วยวัสดุเสริม เช่น ซีโอไลท์ ซึ่งจะช่วยเพิ่มความพรุนหรือเสถียรภาพของโครงสร้างอิฐในระดับจุลภาค

3) อิฐมอญแบบไม่เผาที่ผสมซีโอไลท์ร้อยละ 20 จากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าเนื้อวัสดุของอิฐมอญแบบไม่เผาที่ผสมซีโอไลท์ร้อยละ 20 มีโครงสร้างจุลภาคที่แน่นและต่อเนื่อง โดยมีลักษณะของ เจลแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) กระจายตัวอยู่ในบริเวณช่องว่างของเนื้อวัสดุ ซึ่งเป็นผลิตผลสำคัญจากกระบวนการปฏิกิริยาไฮเดรชันในวัสดุผสม นอกจากนี้ยังพบลักษณะของรูพรุนขนาดเล็ก (Micropores) ที่กระจายตัวไม่สม่ำเสมอ แต่อยู่ในระดับที่ไม่ก่อให้เกิดโครงสร้างที่หลวมเกินไปดังภาพประกอบที่ 28 ลักษณะรูพรุนนี้สะท้อนถึงการทำงานของซีโอไลท์ที่มีโครงสร้างพรุนตามธรรมชาติ ซึ่งมีบทบาทในการดูดซับน้ำในช่วงต้น และค่อย ๆ ปลดปล่อยออกมาในช่วงต่อมา ส่งผลให้เกิดกระบวนการ การบ่มภายในเนื้อวัสดุ (Internal curing) ที่ช่วยให้การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันดำเนินได้ต่อเนื่อง



ภาพประกอบ 28 ภาพถ่าย SEM ของอิฐที่ผสมซีโอไลท์ร้อยละ 20

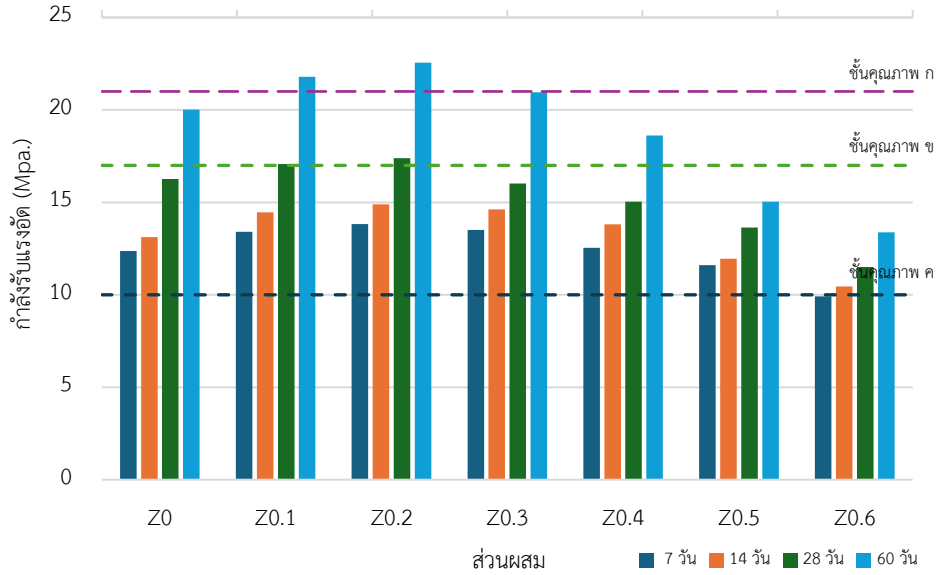
ความต่อเนื่องของเนื้อวัสดุและการกระจายตัวของเจลแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) อย่างสม่ำเสมอในภาพนี้สะท้อนให้เห็นถึงพฤติกรรมของซีโอไลท์ที่ทำหน้าที่เป็นวัสดุปอซโซลานช่วยให้เกิดปฏิกิริยาเสริมภายหลังจากการบ่ม ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่อการพัฒนาความแข็งแรงของวัสดุ

โดยรวมแล้ว ภาพ SEM นี้แสดงให้เห็นถึงโครงสร้างภายในที่มีความหนาแน่นเหมาะสม มีพัฒนาการของปฏิกิริยาไฮเดรชัน และมีความสมดุลระหว่างช่องว่างและเนื้อวัสดุ ซึ่งสามารถสะท้อน

ถึงศักยภาพของซีโอไลท์ในการช่วยเสริมสมบัติเชิงกลและความทนทานในระยะยาวของอิฐมอญแบบไม่เผาที่ผสมซีโอไลท์

4.4 กำลังรับแรงอัด (Compression strength)

จากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของอิฐมอญแบบไม่เผาที่ผสมซีโอไลท์ที่มีการผสมซีโอไลท์ในสัดส่วนต่างๆ พบว่า การเพิ่มปริมาณซีโอไลท์ในช่วง ร้อยละ 10 ถึง 20 โดยน้ำหนักส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของวัสดุเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ไม่มีซีโอไลท์ (Z0) อย่างมีนัยสำคัญ ดังภาพประกอบที่ 29



ภาพประกอบ 29 กำลังรับแรงอัดของอิฐมอญแบบไม่เผาผสมซีโอไลท์

การเติมซีโอไลท์ในส่วนผสมอิฐมอญแบบไม่เผาที่ผสมซีโอไลท์ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) กับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) จากปูนซีเมนต์ โดยปฏิกิริยาดังกล่าวนำไปสู่การเกิดเจลแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต (C-A-H) ซึ่งมีส่วนช่วยเสริมสร้างโครงสร้างภายในของอิฐให้มีความหนาแน่นและสามารถรับกำลังรับแรงอัดได้สูงขึ้น โดยเฉพาะในช่วงอายุ 28 ถึง 60 วัน จากการศึกษาของ Mertens และคณะ (2009) พบว่าซีโอไลท์ธรรมชาติสามารถเกิดปฏิกิริยาแบบปอซโซลานกับไลม์ได้ โดยเฉพาะ Clinoptilolite ที่มีอัตราส่วน Si/Al สูงและมีความสามารถในการแลกเปลี่ยน Na^+ ซึ่งช่วยเพิ่ม pH และเร่งการละลายซิลิกา ส่งผลให้เกิดเจลแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรงของวัสดุได้อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ X-ray Fluorescence (XRF) พบว่าซี

โอไลท์มีองค์ประกอบของซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) ในปริมาณสูง ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับ $Ca(OH)_2$ เพื่อสร้างสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต (C-A-S-H) ซึ่งเป็นโครงสร้างสำคัญที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรงของวัสดุ อย่างไรก็ตามการเพิ่มปริมาณซีโอไลท์เกินร้อยละ 20 ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดลดลง การเปลี่ยนแปลงกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างในช่วงอายุที่แตกต่างกัน (7, 14, 28 และ 60 วัน) แสดงให้เห็นแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วง 28 ถึง 60 วัน ซึ่งเป็นผลมาจากปฏิกิริยาปอซโซลานที่ดำเนินไปอย่างต่อเนื่องและการก่อตัวของผลึกแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต (C-A-S-H) ที่เพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป ผลการวิเคราะห์ X-ray Diffraction (XRD) ยืนยันการปรากฏของสารประกอบเหล่านี้ในตัวอย่างที่มีซีโอไลท์ ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงบทบาทของซีโอไลท์ในการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของวัสดุ

เมื่อพิจารณาเกณฑ์กำลังรับแรงอัดตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก. 77-2565) พบว่าส่วนผสมที่มีซีโอไลท์ในช่วง ร้อยละ 10 ถึง 20 (Z0.1 และ Z0.2) มีค่ากำลังรับแรงอัดที่สอดคล้องกับข้อกำหนดของบางชั้นคุณภาพ ดังแสดงตารางที่ 14 ในขณะที่ส่วนผสมของอิฐมอญแบบไม่เผาที่ผสมซีโอไลท์มากกว่า ร้อยละ 20 มีค่ากำลังรับแรงอัดลดลง อันเนื่องมาจากการลดลงของปริมาณสารยึดเกาะหลักส่งผลให้โครงสร้างวัสดุมีรูพรุนมากขึ้น

ตาราง 16 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของอิฐและเปรียบเทียบ มอก.77-2565

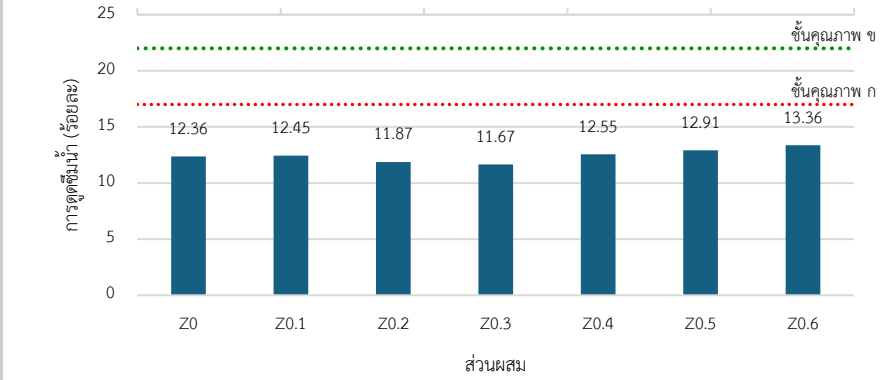
ส่วนผสม	7 วัน (เมกะปาสคาล)	14 วัน (เมกะปาสคาล)	28 วัน (เมกะปาสคาล)	60 วัน (เมกะปาสคาล)	การเปรียบเทียบกับ มอก.77-2565
Z0	12.37	13.12	16.28	20.03	ผ่าน ค
Z0.1	13.42	14.46	17.08	21.81	ผ่าน ข, ค
Z0.2	13.84	14.91	17.40	22.57	ผ่าน ข, ค
Z0.3	13.52	14.63	16.03	20.97	ผ่าน ค
Z0.4	12.55	13.81	15.05	18.63	ผ่าน ค
Z0.5	11.61	11.96	13.65	15.04	ผ่าน ค
Z0.6	9.92	10.45	11.51	13.38	ผ่าน ค

ดังนั้น ปริมาณซีโอไลท์ที่เหมาะสมสำหรับการเพิ่มกำลังรับแรงอัดของอิฐมอญแบบไม่เผาที่ผสมซีโอไลท์อยู่ในช่วง ร้อยละ 10 (Z0.1) ถึง 20 (Z0.2) ซึ่งสามารถเสริมสร้างปฏิกิริยาปอซโซลานและปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคของวัสดุ ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ผสมซี

โอไลท์ นอกจากนี้ กำลังรับแรงอัดของอิฐมอญมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอายุของตัวอย่าง ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงกระบวนการพัฒนาความแข็งแรงของวัสดุที่เกี่ยวข้องกับการเกิดผลึกใหม่และการลดลงของ $Ca(OH)_2$ ในโครงสร้าง

4.5 การดูดซึมน้ำ (Water absorption)

จากการศึกษาผลกระทบของซีโอไลท์ต่อคุณสมบัติการดูดซึมน้ำของอิฐ พบว่า ปริมาณซีโอไลท์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อค่าการดูดซึมน้ำของวัสดุอย่างมีนัยสำคัญ โดยส่วนผสมที่มีซีโอไลท์ในช่วง ร้อยละ 20 ถึง 30 โดยน้ำหนัก (Z0.2 และ Z0.3) มีค่าการดูดซึมน้ำลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ไม่มีซีโอไลท์ (Z0) อย่างไรก็ตาม เมื่อปริมาณซีโอไลท์เพิ่มขึ้นเกินร้อยละ 30 ค่าการดูดซึมน้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ดังภาพประกอบที่ 30



ภาพประกอบ 30 การดูดซึมน้ำของอิฐมอญแบบไม่เผาผสมซีโอไลท์

จากการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของอิฐมอญแบบไม่เผาที่ผสมซีโอไลท์ พบว่าการดูดซึมน้ำเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อความทนทานและประสิทธิภาพเชิงโครงสร้างของวัสดุ ตารางที่ 15 แสดงผลการทดสอบการดูดซึมน้ำของส่วนผสมต่างๆ ภายใต้เกณฑ์การประเมินตามมาตรฐาน มอก. 77-2565 ซึ่งประกอบด้วยการวัดค่าเฉลี่ย 5 ก้อนและค่าสูงสุดของแต่ละก้อน โดยผลการศึกษานี้จะช่วยประเมินความเหมาะสมของการใช้งาน

ตาราง 17 ผลการทดสอบการดูดซึมของอิฐมอญแบบไม่เผาที่ผสมซีโอไลท์และเปรียบเทียบ มอก.77-2565

ส่วนผสม	การดูดซึมน้ำเฉลี่ย (ร้อยละ)	ค่าสูงสุดแต่ละก้อน (ร้อยละ)	การเปรียบเทียบกับ มอก.77-2565	หมายเหตุ
Z0	12.85	13.20	ผ่าน ก, ข	-
Z0.1	12.40	12.90	ผ่าน ก, ข	-
Z0.2	11.20	11.50	ผ่าน ก, ข	การดูดซึมน้ำต่ำที่สุด
Z0.3	12.10	12.40	ผ่าน ก, ข	-
Z0.4	12.30	12.70	ผ่าน ก, ข	-
Z0.5	12.50	12.80	ผ่าน ก, ข	-
Z0.6	12.80	13.10	ผ่าน ก, ข	

จากผลการทดสอบโดยวิธี X-ray Fluorescence (XRF) แสดงให้เห็นว่าซีโอไลท์มีองค์ประกอบหลักเป็นซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ ส่งผลให้เกิดสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต (C-A-S-H) ซึ่งช่วยลดขนาดและปริมาณของรูพรุน ส่งผลให้ค่าการดูดซึมน้ำของอิฐมอญแบบไม่เผาที่ผสมซีโอไลท์ในช่วงร้อยละ 20 ถึง 30 ลดลง อย่างไรก็ตามเมื่อปริมาณซีโอไลท์เพิ่มขึ้นเกินร้อยละ 30 ปริมาณปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกที่ทำหน้าที่เป็นสารยึดเกาะหลักลดลง ส่งผลให้เกิดโครงสร้างที่มีรูพรุนมากขึ้นและมีแนวโน้มดูดซึมน้ำสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ X-ray Diffraction (XRD) ที่แสดงให้เห็นถึงการลดลงของสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และการเพิ่มขึ้นของช่องว่างในโครงสร้าง

การเปรียบเทียบค่าการดูดซึมน้ำกับกำลังรับแรงอัดของอิฐมอญแบบไม่เผาผสมซีโอไลท์พบว่าส่วนผสมที่มีค่าการดูดซึมน้ำต่ำ (Z0.2 และ Z0.3) ซึ่งเป็นส่วนผสมที่มีกำลังรับแรงอัดสูง สะท้อนให้เห็นถึงโครงสร้างที่มีความหนาแน่นสูงและมีปริมาณรูพรุนต่ำ ในทางตรงกันข้ามอิฐมอญแบบไม่เผาผสมซีโอไลท์เกินร้อยละ 30 เช่น อิฐมอญแบบไม่เผาผสมซีโอไลท์ร้อยละ 50 ถึง 60 มีค่าการดูดซึมน้ำสูงและกำลังรับแรงอัดลดลง ซึ่งเป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของความพรุนและการลดลงของปริมาณสารยึดเกาะในโครงสร้างวัสดุ

ดังนั้น ปริมาณซีโอไลท์ที่เหมาะสมสำหรับการลดค่าการดูดซึมน้ำของอิฐมอญแบบไม่เผาผสมซีโอไลท์อยู่ในช่วงร้อยละ 20 ถึง 30 เนื่องจากสามารถช่วยลดความพรุนและเพิ่มความหนาแน่นของวัสดุ อย่างไรก็ตามการใช้ซีโอไลท์ในปริมาณที่สูงเกินไปอาจส่งผลให้โครงสร้างวัสดุมีรูพรุนเพิ่มขึ้น

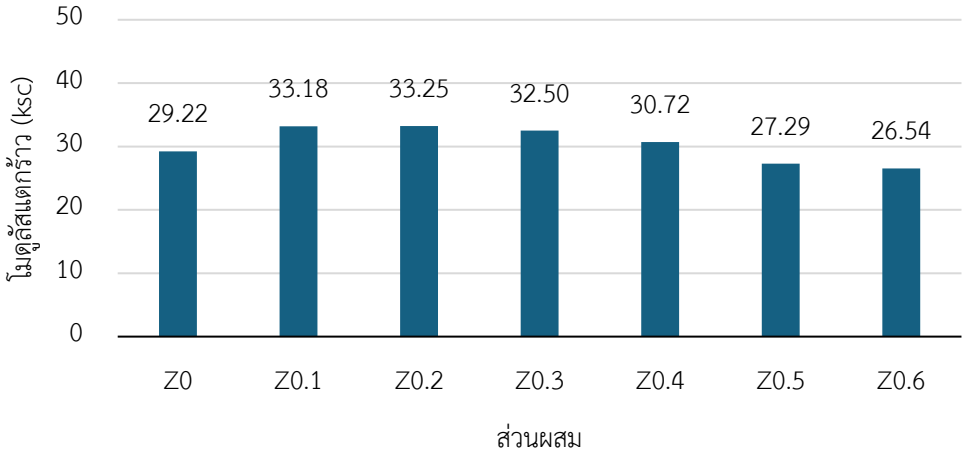
ส่งผลให้ค่าการดูดซึมน้ำสูงขึ้นและสมบัติเชิงกลลดลง ซึ่งจำเป็นต้องพิจารณาให้เหมาะสมกับการใช้งานจริง

4.6 โมดูลัสแตกร้าว (Modulus of rupture)

โมดูลัสแตกร้าวเป็นดัชนีชี้วัดที่สำคัญในการประเมินสมบัติทางกลของอิฐมอญแบบไม่เผาผสมซีโอไลท์ โดยเฉพาะความสามารถในการต้านทานแรงดัดก่อนการแตกหัก ซึ่งสะท้อนถึงความทนทานเชิงโครงสร้างของอิฐมอญแบบไม่เผาผสมซีโอไลท์ เมื่อพิจารณาอิฐมอญแบบไม่เผาผสมซีโอไลท์ที่มีโมดูลัสแตกร้าวสูงจะทำให้มีข้อได้เปรียบด้านความทนทานต่อการโก่งตัวจากแรงด้านข้างและลดการเกิดรอยร้าวขนาดเล็กเมื่อรับน้ำหนักไม่สมมาตร เหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับโครงสร้างที่ต้องรับแรงสั่นสะเทือน อย่างไรก็ตามอิฐมอญแบบไม่เผาผสมซีโอไลท์ก็จะมีความเปราะบางสูงและต้องการกระบวนการผลิตที่ควบคุมอย่างเข้มงวด ในทางตรงกันข้าม อิฐมอญแบบไม่เผาผสมซีโอไลท์ที่มีโมดูลัสแตกร้าวต่ำจะมีความยืดหยุ่นสูงกว่าสามารถดูดซึมพลังงานจากการสั่นสะเทือนได้ดีและมีต้นทุนการผลิตต่ำกว่า แต่ก็มีข้อจำกัดด้านความเสี่ยงต่อการแตกร้าวเมื่อรับแรงกระทำซ้ำๆ ซึ่งจำกัดขอบเขตการใช้งานในงานโครงสร้างหลัก

การทดสอบโมดูลัสแตกร้าวมีความสำคัญอย่างยิ่งในการประเมินความทนทานต่อแรงดัดของอิฐมอญแบบไม่เผาผสมซีโอไลท์ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญเมื่อต้องรับน้ำหนักในแนวขวาง เช่น ในกรณีของการใช้เป็นผนังรับแรงหรือพื้น โดยค่าดังกล่าวช่วยในการวิเคราะห์แนวโน้มการแตกร้าวจากหลายปัจจัย ทั้งการทรุดตัวของโครงสร้าง แรงสั่นสะเทือน และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ นอกจากนี้ยังเป็นดัชนีชี้วัดความสม่ำเสมอของกระบวนการผลิต ทั้งในแง่อัตราส่วนส่วนผสม กระบวนการบ่ม และความหนาแน่นของเนื้อวัสดุ

จากการศึกษาผลกระทบของซีโอไลท์ต่อคุณสมบัติทางกลของอิฐมอญแบบไม่เผาผสมซีโอไลท์ พบว่า การเพิ่มปริมาณซีโอไลท์ในช่วงร้อยละ 10 ถึง 20 โดยน้ำหนักส่งผลให้ค่าโมดูลัสแตกหักเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ผสมซีโอไลท์ (Z0) อย่างมีนัยสำคัญ จากการศึกษาของ Gowram และคณะ (2021) พบว่าการใช้ซีโอไลต์ธรรมชาติร่วมกับเมตาเคโอลินเป็นสารผสมแทนบางส่วนของซีเมนต์ในคอนกรีตกำลังสูง ส่งผลให้ค่ากำลังดัดหรือโมดูลัสแตกร้าวเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะในอัตราส่วนผสมที่ประกอบด้วยซีเมนต์ร้อยละ 85, ซีโอไลท์ร้อยละ 5 และเมตาเคโอลินร้อยละ 10 ซึ่งให้ค่ากำลังดัดสูงสุดถึง 9.44 เมกะปาสคาล ที่อายุ 90 วัน ผลลัพธ์นี้แสดงถึงศักยภาพของวัสดุปอซโซลานในการเสริมสร้างความแข็งแรงด้านแรงดัดและความทนทานในระยะยาวของคอนกรีต อย่างไรก็ตามเมื่อปริมาณซีโอไลท์เกินร้อยละ 20 มีค่าโมดูลัสแตกหักมีแนวโน้มลดลง ซึ่งสอดคล้องกับการทดสอบกำลังรับแรงอัด ดังภาพประกอบที่ 31



ภาพประกอบ 31 โมดูลัสแตกร้าวของอิฐมอญแบบไม่เผาผสมซีโอไลท์

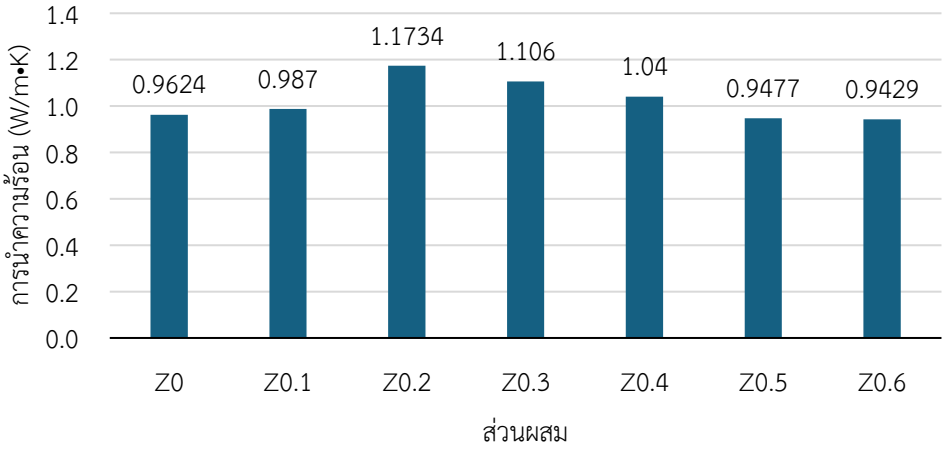
จากผลการทดสอบ X-ray Fluorescence (XRF) แสดงให้เห็นว่าซีโอไลท์มีองค์ประกอบหลักเป็นซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับ $Ca(OH)_2$ เพื่อสร้างสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต (C-A-S-H) ซึ่งเป็นสารที่ช่วยเสริมสร้างความแข็งแรงและความทนทานของวัสดุ ส่งผลให้ค่าโมดูลัสแตกหักเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม เมื่อปริมาณซีโอไลท์เกินร้อยละ 20 ปริมาณสารยึดเกาะหลักจะลดลง ส่งผลให้โครงสร้างวัสดุมีรูพรุนเพิ่มขึ้นและเปราะมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบ X-ray Diffraction (XRD) ที่แสดงให้เห็นว่าอัตราการก่อตัวของผลึกแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต (C-A-S-H) ลดลง

การเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงอัดและโมดูลัสแตกหักแสดงให้เห็นแนวโน้มที่เป็นไปในทิศทางเดียวกัน โดยส่วนผสมที่ให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูง (Z0.1 และ Z0.2) มักมีค่าโมดูลัสแตกหักสูง ขณะที่ส่วนผสมที่มีกำลังรับแรงอัดต่ำ (Z0.5 และ Z0.6) มีค่าโมดูลัสแตกหักลดลงเช่นกัน ซึ่งสะท้อนถึงโครงสร้างภายในของวัสดุที่ได้รับอิทธิพลจากปริมาณซีโอไลท์

ดังนั้น ปริมาณซีโอไลท์ที่เหมาะสมในการเพิ่มโมดูลัสแตกหักของอิฐมอญแบบไม่เผาผสมซีโอไลท์อยู่ในช่วงร้อยละ 10 ถึง 20 เนื่องจากสามารถเสริมสร้างปฏิกิริยาปอซโซลานและพัฒนาโครงสร้างจุลภาคของวัสดุให้มีความแข็งแรงมากขึ้น อย่างไรก็ตามการใช้ซีโอไลท์ในสัดส่วนที่สูงเกินไปอาจทำให้โครงสร้างวัสดุมีความเปราะและมีรูพรุนมากขึ้น ส่งผลให้ความสามารถในการรับแรงดัดลดลง ซึ่งจำเป็นต้องพิจารณาให้เหมาะสมกับการใช้งานจริง

4.7 การนำความร้อน (Thermal conductivity)

จากการศึกษาผลกระทบของซีโอไลท์ต่อค่าการนำความร้อนของอิฐมอญแบบไม่เผาผสมซีโอไลท์พบว่าปริมาณซีโอไลท์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าการนำความร้อนของวัสดุ โดยส่วนผสมที่มีซีโอไลท์ในช่วงร้อยละ 20 ถึง 30 โดยน้ำหนัก (Z0.2 - Z0.3) มีค่าการนำความร้อนสูงกว่าตัวอย่างควบคุม (Z0) อย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตามเมื่อปริมาณซีโอไลท์เพิ่มขึ้นเกินร้อยละ 20 (Z0.4 - Z0.6) ค่าการนำความร้อนของวัสดุมีแนวโน้มลดลง ดังภาพประกอบที่ 32



ภาพประกอบ 32 การนำความร้อนของอิฐมอญแบบไม่เผาผสมซีโอไลท์

ผลการวิเคราะห์ X-ray Fluorescence (XRF) แสดงให้เห็นว่าซีโอไลท์มีองค์ประกอบหลักเป็นซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์แคลเซียม ($Ca(OH)_2$) ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ ส่งผลให้เกิดสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต (C-A-S-H) ซึ่งช่วยเพิ่มความหนาแน่นของวัสดุ ส่งผลให้ค่าการนำความร้อนของส่วนผสมที่มีซีโอไลท์ในช่วงร้อยละ 10 ถึง 20 เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อปริมาณซีโอไลท์เกินร้อยละ 20 ปริมาณสารยึดเกาะหลักลดลง ส่งผลให้โครงสร้างวัสดุมีรูพรุนมากขึ้นทำให้การถ่ายเทพลังงานความร้อนลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ X-ray Diffraction (XRD) ที่แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างของวัสดุที่มีซีโอไลท์สูงมีแนวโน้มเกิดช่องว่างมากขึ้น ส่งผลให้ค่าการนำความร้อนลดลง

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อนและค่าความหนาแน่นของวัสดุ พบว่าส่วนผสมที่มีค่าการนำความร้อนสูง (Z0.2 และ Z0.3) มีค่าความหนาแน่นสูงกว่าส่วนผสมอื่น ๆ แสดงให้เห็นว่าความหนาแน่นของวัสดุมีอิทธิพลต่อการถ่ายเทความร้อน ในทางกลับกันส่วนผสมที่มีค่าการ

นำความร้อนต่ำ (Z0.5 และ Z0.6) มีค่าความหนาแน่นลดลงอย่างชัดเจน ซึ่งเป็นผลจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณรูพรุนในวัสดุ ส่งผลให้การถ่ายเทพลังงานความร้อนลดลง

4.8 การเปรียบเทียบคุณสมบัติกับอิฐชนิดต่างๆ

หากพิจารณากำลังรับแรงอัดและการดูดซึมน้ำที่อายุ 28 วันเปรียบเทียบกับเกณฑ์ที่กำหนดในมาตรฐาน มอก.77-2565 รวมถึงการที่สามารถใช้ประโยชน์จากซีโอไลท์ได้สูงสุด จะได้ว่า ส่วนผสมที่แนะนำของอิฐชั้นคุณภาพ ข และ ค คือ ส่วนผสมที่ใช้ซีโอไลท์แทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 และ 60 ตามลำดับ กล่าวได้ว่า ซีโอไลท์สามารถนำมาใช้เป็นส่วนผสมในอิฐมอญแบบไม่เผาด้วยการแทนที่ปูนซีเมนต์ได้ในปริมาณที่สูงมาก คือ แทนที่ปูนซีเมนต์ได้ถึงร้อยละ 60 ตารางที่ 14 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของอิฐมอญแบบไม่เผาผสมซีโอไลท์ของส่วนผสมที่แนะนำกับอิฐมอญดั้งเดิมที่ผ่านการเผา จะเห็นว่า อิฐมอญแบบไม่เผาผสมซีโอไลท์มีคุณสมบัติที่เหนือกว่าอิฐมอญดั้งเดิมในด้านกำลังรับแรงอัด การดูดซึมน้ำ โมดูลัสแตกร้าว และขนาดคลาดเคลื่อน แต่มีความหนาแน่นและที่ด้อยกว่า ส่วนการนำความร้อนมีค่าใกล้เคียงกัน ทั้งนี้ การพัฒนาคุณสมบัติของอิฐมอญแบบไม่เผาผสมซีโอไลท์ให้สามารถผ่านเกณฑ์มาตรฐาน มอก.77-2565 ชั้นคุณภาพ ก เป็นสิ่งน่าสนใจที่จะศึกษาวิจัยต่อไปในอนาคต

ตาราง 18 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของอิฐมอญแบบไม่เผาผสมซีโอไลท์ของส่วนผสมที่แนะนำกับอิฐมอญดั้งเดิมที่ผ่านการเผา

คุณสมบัติ	**อิฐมอญแบบไม่เผาที่ผสมซีโอไลท์ (28 วัน)**	**อิฐมอญดั้งเดิม**	**มอก. 77-2565**
ค่ากำลังรับแรงอัด (กก/ตร.ซม.)	177.4 (ส่วนผสม Z0.2) 117.3 (ส่วนผสม Z0.6)	26.4 ถึง 141.2[2]	(ชั้นคุณภาพ ข.) (ชั้นคุณภาพ ค.)
ค่าดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)	11.9 (ส่วนผสม Z0.2) 13.4 (ส่วนผสม Z0.6)	13.5 ถึง 17.7[2]	(ชั้นคุณภาพ ข.)
โมดูลัสแตกหัก (กก/ตร.ซม.)	33.3 (ส่วนผสม Z0.2) 26.5 (ส่วนผสม Z0.6)	5.5 ถึง 11.5[3]	ไม่กำหนด
ความคลาดเคลื่อน (มม.)	ไม่เกิน 0.7	1.0 ถึง 9.5[2]	$\pm$2 ถึง $\pm$5
ความหนาแน่น (กก./ลบ.ม)	1.700$\pm$0.01	1.255 ถึง 1.389[3]	ไม่กำหนด

4.8 การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์

การนำซีโอไลท์เหลือทิ้งมาใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตอิฐมอญแบบไม่เผาไม่เพียงแต่ช่วยปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพและทางกลของอิฐ แต่ยังส่งผลต่อด้านเศรษฐศาสตร์ของกระบวนการผลิต โดยสามารถวิเคราะห์ในแง่ ต้นทุนการผลิต ต้นทุนต่อหน่วย เปรียบเทียบต้นทุนกับอิฐชนิดต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 17 และความคุ้มค่าในการใช้งาน ได้ดังตารางที่ 18

การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตอิฐมอญแบบไม่เผาผสมซีโอไลท์ ต่อ 1 ก้อน (ขนาดมาตรฐาน: 14×6.5×4 ซม. น้ำหนักเฉลี่ย: 0.620 กก./ก้อน) เลือกอัตราส่วนผสม Z0.2 ในการคำนวณปริมาณวัสดุต่อก้อน โดยการคำนวณตามหลักการผสมวัสดุเชิงปริมาตร

1. คำนวนหาปริมาณวัสดุ
   ปูนซีเมนต์ = (0.8/7)×0.620 = 0.071 กก.
   ดิน = (6/7)×0.620 = 0.531 กก.
   ซีโอไลท์ = (0.2/7)×0.620 = 0.018 กก.
   น้ำ = 0.062 กก.
2. ต้นทุนวัสดุ (ปี 2566)
   วัสดุราคาต่อหน่วย
   ปูนซีเมนต์ 2.64 บาท/กก. (ที่มา : https:// https://www.thaiwatsadu.com)
   ดินลูกรัง 0.16 บาท/กก. (อ้างอิงราคาการคิดราคากลางของกรมทางหลวง)
   ซีโอไลท์ 0.00 บาท/กก. (ของเสียจากโรงงานผลิตไนโตรเจนเหลว)
   น้ำ 0.01 บาท/ลิตร (อัตราค่าน้ำประปาส่วนภูมิภาค)
3. การคำนวณต้นทุน:
   ปูนซีเมนต์: 0.071×2.64 = 0.19 บาท
   ดิน: 0.531×0.16 = 0.09 บาท
   ซีโอไลท์: 0.071×0.00 = 0.00 บาท
   น้ำ: 0.062×0.01 = 0.0006 บาท
   รวมวัสดุ: 0.28 บาท
4. ต้นทุนการผลิต
   ค่าแรง: 0.06 บาท (คิดราคาที่ ร้อยละ 30 ของราคาวัสดุ)
   ค่าโสหุ้ย: 0.30 บาท
   รวมต้นทุนการผลิต: 0.36 บาท
   ต้นทุนรวม 0.64 บาทต่อก้อน

ตาราง 19 การเปรียบเทียบราคาอิฐชนิดต่าง ๆ

ประเภทอิฐ	ขนาด(ซม.)	จำนวนก้อนต่อ 1 ตร.ม.	ราคาต่อก้อน (บาท)	ราคาต่อ 1 ตร.ม. (บาท)
อิฐมอญไม่เผา + ซีโอไลท์ ร้อยละ 20 (งานวิจัยนี้)	14 × 6.5 × 4	≈ 110 ก้อน	0.64	70.4
อิฐมอญดั้งเดิม (มีการเผา)	6.5 × 11 × 20	≈ 72 ก้อน	1.20	86.40
อิฐบล็อก (คอนกรีตบล็อก)	7 × 14 × 39	≈ 12 ก้อน	7.50	90.00
อิฐมวลเบา (AAC Block)	7 × 20 × 60	≈ 8 ก้อน	20.00	160.00
อิฐดินซีเมนต์ (CSEB)	10 × 20 × 30	≈ 16 ก้อน	6.00	96.00

พหุน ปณ ฑิโต ชีเว

ตาราง 20 ตารางวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์ของอิฐแต่ละประเภท

ประเภทอิฐ	ราคาต่อ 1 ตร.ม. (บาท)	คุณสมบัติเด่น	ต้นทุนวัสดุ	ความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์
อิฐมอญไม่เผา + ซีโอไลท์ร้อยละ 20 (งานวิจัย)	246.40	เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม, ลดคาร์บอนฟุตพริ้นท์	ต่ำ	ด้านสิ่งแวดล้อมดี แต่ต้นทุนสูง
อิฐมอญเผา	86.40	หาซื้อง่าย, ต้นทุนต่ำ, นิยมใช้อย่างแพร่หลาย	ต่ำ	คุ้มค่าสำหรับงานทั่วไปมาก
อิฐบล็อก (คอนกรีตบล็อก)	90.00	ติดตั้งเร็ว, แข็งแรง, ขนาดใหญ่ลดเวลาในการก่อ	ต่ำ	คุ้มค่าทั้งด้านแรงงานและวัสดุ
อิฐมวลเบา (AAC Block)	160.00	กันร้อน-กันเสียงดีเยี่ยม, น้ำหนักเบา	ปานกลาง	เหมาะกับอาคารที่ต้องการประสิทธิภาพสูง
อิฐดินซีเมนต์ (CSEB)	96.00	ใช้วัสดุท้องถิ่น, ผลิตง่ายในพื้นที่ก่อสร้าง	ต่ำ	ยั่งยืนและเหมาะกับชุมชน

หากจะกล่าวถึงความคุ้มค่าในการใช้งาน อิฐที่ผสมซีโอไลท์ร้อยละ 20 มีคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับการก่อสร้างและมีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ในหลายด้าน ได้แก่

1.ลดการใช้วัสดุและลดต้นทุนพลังงานไม่ต้องใช้พลังงานในการเผาซึ่งเป็นการลดค่าใช้จ่ายด้านเชื้อเพลิง ลดต้นทุนระยะยาว

2.มีค่าการดูดซึมน้ำต่ำและความแข็งแรงสูง ทำให้อายุการใช้งานยาวนานกว่าบางประเภทของอิฐมอญทั่วไป เหมาะกับแนวคิดการก่อสร้างแบบยั่งยืน

3.เป็นวัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและสามารถช่วยลดผลกระทบจากของเสียอุตสาหกรรม

จากการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ อิฐที่ผสมซีโอไลท์ร้อยละ 20 เป็นตัวเลือกที่คุ้มค่าเนื่องจากช่วยลดต้นทุนทั้งในด้านวัตถุดิบและพลังงาน ในขณะที่ยังคงมีคุณสมบัติทางกลที่ดีและสามารถแข่งขันกับอิฐมอญดั้งเดิมได้ดี นอกจากนี้ยังมีศักยภาพในการนำไปใช้เชิงพาณิชย์ เนื่องจากเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและเหมาะกับแนวคิดการก่อสร้างสีเขียว (Green construction)

พหูน ปณฺฑิโต ชีเว

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติของอิฐมอญแบบไม่เผาที่มีส่วนผสมของซีโอไลท์เหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตไนโตรเจนเหลว โดยมุ่งเน้นการนำวัสดุเหลือทิ้งมาใช้ประโยชน์ในการผลิตวัสดุก่อสร้างที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการกำจัดวัสดุเหลือทิ้ง

จากการศึกษาพบว่า

กำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงอัดของอิฐเพิ่มขึ้นจนถึงส่วนผสม Z0.2 แล้วลดลงเมื่อเพิ่มซีโอไลท์มากเกินไป ส่วนผสมที่มีกำลังรับแรงอัดสูงสุดคือ Z0.2 (17.40 เมกะปาสคาล ที่ 28 วัน) ผ่าน มอก.77/2565 ผ่านเฉพาะชั้นคุณภาพ ข และ ค

การดูดซึมน้ำ การดูดซึมน้ำลดลงเมื่อเพิ่มซีโอไลท์จนถึง Z0.2 แล้วเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ทุกผสมที่ผ่าน มอก.77/2565 ทุกส่วนผสมผ่านเกณฑ์ชั้นคุณภาพ ก (ร้อยละ 17) และ ชั้นคุณภาพ ข (น้อยกว่าร้อยละ 22) และส่วนผสมที่ดีที่สุดคือ Z0.2 (ร้อยละ 11.20)

โมดูลัสแตกร้าว ค่าโมดูลัสแตกร้าวเพิ่มขึ้นสูงสุดที่ Z0.1 ถึง Z0.3 แล้วลดลงเมื่อเพิ่มซีโอไลท์เกินร้อยละ 30 ค่า โมดูลัสแตกร้าวสูงสุดคือ Z0.1 (253.28 กิโลกรัม) และ Z0.3 (248.11 กิโลกรัม)

การนำความร้อน การนำความร้อนเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณซีโอไลท์ ค่าการนำความร้อนสูงสุดคือ Z0.4 (1.3072 วัตต์/เมตร-เคลวิน) ต่ำสุดคือ Z0.6 (0.9429 วัตต์/เมตร-เคลวิน)

องค์ประกอบและผลกระทบของซีโอไลท์ องค์ประกอบสำคัญคือซิลิกา (SiO_2) และอลูมินา (Al_2O_3) โครงสร้างรูพรุนระดับนาโน ผลกระทบด้านบวกคือ เพิ่มกำลังรับแรงอัดและความแข็งแรง ลดการดูดซึมน้ำ ปรับปรุงความทนทาน ผลกระทบด้านลบคือ อาจลดความยืดหยุ่นหากใช้มากเกินไป

5.2 ข้อเสนอแนะ

1.1 อิฐมอญแบบไม่เผาที่ผสมซีโอไลท์ร้อยละ 10 ถึง 20 สามารถนำไปใช้ในงานก่อสร้างได้จริง เนื่องจากมีคุณสมบัติทางวิศวกรรมที่ผ่านมาตรฐาน มอก.77-2545 และมีคุณสมบัติการเป็นฉนวนความร้อนที่ดีขึ้น

1.2 ควรมีการทดลองนำอิฐมอญแบบไม่เผาที่ผสมซีโอไลท์ไปใช้ในงานก่อสร้างจริง เพื่อประเมินประสิทธิภาพในสภาพแวดล้อมจริงและความทนทานในระยะยาว

1.3 การใช้ซีโอไลท์เหลือทิ้งช่วยลดต้นทุนการผลิตอิฐมอญแบบไม่เผาที่ผสมซีโอไลท์และลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม จึงควรส่งเสริมการใช้ในอุตสาหกรรมก่อสร้าง

1.4 ควรศึกษาการใช้ซีโอไลท์ร่วมกับวัสดุอื่น ๆ เช่น เถ้าลอยหรือขี้เถ้าแกลบ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของอิฐมอญแบบไม่เผาและลดการใช้ปูนซีเมนต์

1.5 ควรมีการศึกษาผลกระทบของซีโอไลท์ต่อคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของอิฐมอญแบบไม่เผาที่ผสมซีโอไลท์ในสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน เช่น ในสภาพอากาศร้อนชื้นหรือสภาพอากาศแห้งแล้ง

5.3 สรุป

จากการศึกษาคุณสมบัติของอิฐมอญแบบไม่เผาที่ผสมซีโอไลท์ในสัดส่วนต่าง ๆ พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณซีโอไลท์ตั้งแต่ร้อยละ 10 ถึง 30 โดยมวล ส่งผลให้คุณสมบัติเชิงวิศวกรรมของอิฐเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางที่ดีขึ้น โดยเฉพาะในด้านกำลังรับแรงอัด การดูดซึมน้ำ โมดูลัสการแตกร้าว และการนำความร้อน กล่าวคือ ส่วนผสมที่มีซีโอไลท์ร้อยละ 20 ให้ค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยสูงสุดที่อายุ 7 วัน คือ 141.12 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และยังให้ค่าการดูดซึมน้ำลดลง เมื่อเทียบกับส่วนผสมที่มีไม่ซีโอไลท์ (Z0) โดยค่าการนำความร้อนของอิฐมอญแบบไม่เผาลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเพิ่มปริมาณซีโอไลท์ ซึ่งสะท้อนถึงประสิทธิภาพด้านฉนวนความร้อนที่ดีขึ้น ส่วนค่าโมดูลัสแตกร้าวก็เพิ่มขึ้นอย่างสอดคล้องกับกำลังรับแรงอัด ซึ่งแสดงถึงความเหนียวและความทนทานต่อการแตกร้าวของอิฐมอญแบบไม่เผาที่ผสมซีโอไลท์ที่ดีขึ้นเช่นกัน

การเปลี่ยนแปลงค่าดังกล่าวยังสัมพันธ์กับ อายุการบ่ม โดยค่ากำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นต่อเนื่องจากอายุ 7 วัน ไปจนถึง 28 วัน อันเป็นผลจากกระบวนการไฮเดรชันและการก่อตัวของสารประกอบซีเมนต์ เช่น แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต (C-A-H) ซึ่งเป็นผลิตผลของปฏิกิริยาเคมีระหว่างซีโอไลท์กับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดจากการบ่ม

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบกับเกณฑ์มาตรฐาน มอก. 77-2565 พบว่า อิฐมอญแบบไม่เผาที่ผสมซีโอไลท์ร้อยละ 20 และ 30 ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน โดยอิฐมอญแบบไม่เผาที่ผสมซีโอไลท์ร้อยละ 20 จัดอยู่ในชั้นคุณภาพ ก และอิฐมอญแบบไม่เผาที่ผสมซีโอไลท์ร้อยละ 30 อยู่ในระดับชั้นคุณภาพ ข ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอิฐมอญแบบไม่เผาที่ผสมซีโอไลท์สามารถนำมาใช้ทดแทนอิฐมอญแบบเผาในงานก่อสร้างได้

ทั้งนี้ จากการประเมินผลด้านกำลังรับแรงอัด ความสามารถในการดูดซึมน้ำ ค่าโมดูลัสแตกร้าว และค่าการนำความร้อน ร่วมกับต้นทุนการผลิตและความเหมาะสมทางวิศวกรรม จึงสามารถสรุปได้ว่า อิฐมอญแบบไม่เผาที่ผสมซีโอไลท์ร้อยละ 20 โดยมวล เป็นส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตอิฐมอญแบบไม่เผา ในงานวิจัยนี้

นอกจากนี้ จากการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบการก่อตัวของผลึกที่มีลักษณะคล้ายเจล ซึ่งสามารถยืนยันได้ว่า ซีโอไลท์ที่เติมลงไปในอิฐมอญแบบไม่เผานั้นสามารถเกิด ปฏิกิริยาปอซโซลาน กับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ภายใต้เงื่อนไขการบ่มที่เหมาะสม ส่งผลให้เกิดโครงสร้างที่แข็งแรงและช่วยลดช่องว่างโพรงในวัสดุได้อย่างมีประสิทธิภาพ

พหุน ปณ ฑิโต ชีเว

บรรณานุกรม

1. ณฐพงศ์ จันทร์เพ็ชร์. (2562). การปรับปรุงคุณภาพอิฐมอญแบบไม่ต้องเผาด้วยเส้นใยฟางข้าวเหลือทิ้งในพื้นที่ภาคกลางเพื่อเชิงพาณิชย์อย่างยั่งยืน. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ.
2. ณัฐชา รัตนสกาว. (2565). การปรับปรุงคุณภาพอิฐมอญแบบไม่ต้องเผาด้วยเส้นใยฟางข้าว (วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต). มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร.
3. จำรัส ลิ้มตระกูล, และคณะ. (2537). การดูดซับแอมโมเนียของซิลิกา, ซีโอไลท์ และซีโอไลท์ดัดแปลง: โครงสร้างและปฏิกิริยา. ใน การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 32 (หน้า 193–214). มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
4. พัทธนันท์ นาถพินิจ, และ ชลธิชา นิวาสประกฤติ. (2565). การเตรียมปุ๋ยละลายช้าที่มีแร่ธาตุไนโตรเจน และโพแทสเซียมโดยใช้ตัวดูดซับซีโอไลต์. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี, 10(2), 163–172.
5. ภูษิต เลิศวัฒนารักษ์, และคณะ. (2550). ผลของวัสดุทางธรรมชาติที่มีต่อคุณสมบัติของก้อนอิฐดินดิบสำหรับการก่อสร้างบ้านดิน. วารสารวิจัยและสาระสถาปัตยกรรม/การผังเมือง, 5(1), 187–199.
6. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. (2565). มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 77–2565: อิฐก่อสร้างสามัญ. กระทรวงอุตสาหกรรม.
7. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. (2565). มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 153–2565: อิฐกลวงก่อแผงไม่รับน้ำหนัก. กระทรวงอุตสาหกรรม.
8. ทวีชัย สำราญวานิช. (2563). ความต้านทานคลอไรด์และกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมซีโอไลท์สังเคราะห์. ใน เอกสารประกอบการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 25 (หน้า MAT17–MAT17). วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์.
9. Abbas, A., Ali, F., Saeed, A., Tariq, M. R., Shah, A. H., & Rehman, R. (2023). Efficacy of natural zeolite and metakaolin as partial replacement of cement in concrete. Case Studies in Construction Materials, 19, e02502. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02502
10. Cokca, E., Yazici, V., & Ozaydin, V. (2004). Effect of zeolite utilization on volume change and strength properties of expansive soil as landfill barrier. Environmental Geology, 45(6), 856–864. https://doi.org/10.1007/s00254-003-0946-1
11. Davidson, D. T., & Associates. (1961). Soil stabilization with cement (Joint Bulletin No. 194). Iowa State University of Science and Technology.

12. Department of the Army & Department of the Air Force. (1994). Soil stabilization for pavements (TM 5-822-14 / AFJMAN 32-1019). U.S. Government Printing Office. https://www.wbdg.org/FFC/ARMYCOE/COETM/ARCHIVES/tm_5_822_14.pdf

13. Herzong, H., & Michell, D. (1963). The chemistry of cement hydration and pozzolanic reactions. Journal of the American Concrete Institute, 60(3), 321–336.

14. Highway Research Board. (1959). Soil-cement: Its use in highway construction (Bulletin No. 243). National Academy of Sciences – National Research Council. https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/23562

15. Moh, Z. C. (1962). Soil stabilization with cement and lime. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 88(6), 89–128.https://trid.trb.org/view/389479

16. National Cooperative Highway Research Program. (2009). Guidelines for cement stabilization of soils and bases (NCHRP Web-Only Document No. 144). Transportation Research Board. https://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/nchrp_w144.pdf

17. Portland Cement Association. (1956). Soil-cement construction handbook (2nd ed.). Chicago, IL: Portland Cement Association.

18. Portland Cement Association. (1959). Soil-cement laboratory handbook (EB052.07s). https://secement.org/wp-content/uploads/2017/04/EB052.07s.pdf

19. Reddy, B. P., Bhavana, V., & Harsha, T. S. (2024). Soil stabilization using cement. International Journal of Research Publication and Reviews, 5(5), 3960–3963. https://ijrpr.com/uploads/V5ISSUE5/IJRPR27039.pdf

20 Ribeiro, B., Labrincha, J. A., Moreira, P. M. M., & Ferreira, V. M. (2020). Pozzolanic reactions of common natural zeolites with lime and parameters affecting their reactivity. Applied Clay Science, 185, 105416. https://doi.org/10.1016/j.clay.2019.105416

21. Sabet, F. A., Libre, N. A., & Shekarchi, M. (2013). Mechanical and durability properties of self-consolidating high performance concrete incorporating natural zeolite, silica fume and fly ash. Construction and Building Materials, 44, 175–184. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.02.069

22. ShahriarKian, M. R., Tavakoli, M., Ghasemzadeh, H., & Hosseini, S. A. (2021). Utilization of zeolite to improve the behavior of cement-stabilized soil. International

Journal of Geosynthetics and Ground Engineering, 7(1), 1–10. https://doi.org/10.1007/s40891-020-00246-4

23. Türköz, M., & Vural, P. (2012). The effects of cement and natural zeolite additives on problematic clay soils. Scientific Research and Essays, 7(4), 422–429.

24. Valipour, M., Pargar, F., Shekarchi, M., & Khani, D. (2013). Comparing a natural pozzolan, zeolite, to metakaolin and silica fume in terms of their effect on the durability characteristics of concrete: A laboratory study. Construction and Building Materials, 41, 879–888. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.054

พหุน ปณ ฑิโต ชีเว

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นายเสกสรรค์ นำสงค์
วันเกิด	12 มีนาคม 2524
สถานที่เกิด	จ.สกลนคร
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	381 หมู่ 2 ต.สว่างแดนดิน อ.สว่างแดนดิน จ.สกลนคร
ตำแหน่งหน้าที่การงาน	วิศวกรโยธาชำนาญการ
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	สำนักงานทางหลวงที่ 6 (เพชรบูรณ์) ต.สะเดียง อ.เมือง จ.เพชรบูรณ์
ประวัติการศึกษา	พ.ศ.2545 ประกาศณียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (ปวส.) สาขาช่างโยธา สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตสกลนคร พ.ศ 2549 วิศวกรรมศาตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร พ.ศ. 2568 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม.) สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

พหูน ปณฺฑิโต ชีเว