

อิฐมอยแบบไม่เผาผสมซีโอไลท์เหลือทิ้ง Unfired clay bricks containing waste zeolite

เสกสรรค์ นำสงค์ (Seksan Numsong)* สุรัชชัย วงชารี (Surachai Wongcharee)**

สมชาย อาจดวงดี (Somchai Arduangdi)*** วิมล วงจัน (Wimol Wongchan)***

มีศักดิ์ธนา พัวพิทยธร (Meesakthana Puapitthayathorn)**** นพปฎล เสงี่ยมศักดิ์ (Noppadol Sangiamsak)^{1*****}

(Received: November 25, 2024; Revised: April 17, 2025; Accepted: April 19, 2025)

บทคัดย่อ

อิฐมอยเป็นวัสดุก่อผนังที่มีการใช้งานมาเป็นเวลานานและยังนิยมในปัจจุบัน การผลิตอิฐมอยต้องผ่านกระบวนการเผาเป็นระยะเวลา 7 ถึง 15 วัน ซึ่งก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศและอิฐมีคุณภาพไม่สม่ำเสมอ งานวิจัยนี้ทำการพัฒนาอิฐมอยที่ไม่ผ่านกระบวนการเผาที่มีการนำซีโอไลท์เหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตไนโตรเจนเหลว 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)

¹Corresponding author: noppadol.s@msu.ac.th

*นิสิต หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

Graduate Student, Master of Engineering Program in Civil Engineering, Faculty of Engineering, Mahasarakham University

**ผู้ช่วยศาสตราจารย์ หน่วยวิจัยทรัพยากรหมุนเวียนและเทคโนโลยีพิทักษ์สิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

Assistant Professor, Renewable Resources and Environmental Protection Technology Research Unit, Faculty of Engineering, Mahasarakham University

***นิสิต หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

Undergraduate Student, Bachelor of Engineering Program in Civil Engineering, Faculty of Engineering, Mahasarakham University

****วิศวกรโยธาปฏิบัติการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

Civil Engineer Practitioner, Faculty of Engineering, Mahasarakham University

*****ผู้ช่วยศาสตราจารย์ หน่วยวิจัยคอนกรีตและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

Assistant Professor, Concrete and Computer Research Unit, Faculty of Engineering, Mahasarakham University

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).

คำสำคัญ: อิฐมอลู ซีโอไลต์ กำลังรับแรงอัด

Keywords: Clay brick, Zeolite, Compressive strength

บทนำ

อิฐมอลู เป็นวัสดุท้องถิ่นหนึ่งที่มีการใช้มาตั้งแต่สมัยโบราณและยังเป็นที่นิยมอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน ผลผลิตจากการนำดินเหนียวผสมกับเถ้าแกลบหรือแกลบดิบและน้ำแล้วนำไปเผาเป็นระยะเวลา 7 ถึง 15 วัน อิฐมอลูมีความแข็งแรงเมื่อเปรียบเทียบกับอิฐชนิดอื่น มีราคาถูก และมีสีที่สวยงาม สามารถใช้เป็นอิฐประดับได้โดยไม่ต้องฉาบ อย่างไรก็ตามกระบวนการเผาอิฐมอลูส่งผลให้เกิดมลพิษทางอากาศทั้งฝุ่นละอองและกลิ่น ใช้ระยะเวลาในการเผาที่ค่อนข้างนาน นอกจากนี้ อิฐยังมีการหดตัวและมีรูปร่างบิดเบี้ยวเนื่องจากการเผา ทำให้ได้ขนาดและรูปร่างที่ไม่ตรงตามความต้องการ อีกทั้งการเผาที่ไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิให้เท่ากันทุกตำแหน่ง ทำให้คุณภาพของอิฐไม่สม่ำเสมอ และอาจมีอิฐที่เผาไม่สุกเนื่องจากได้รับความร้อนไม่เพียงพอ ณัฐพงศ์ [1] ได้พัฒนาอิฐมอลูที่ไม่ต้องเผาโดยใช้การอัดขึ้นรูปใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุเชื่อมประสาน ผสมกับวัสดุอื่นๆ ได้แก่ ดินลูกรัง ฟางข้าว น้ำยางธรรมชาติ น้ำสะอาด สารลดแรงตึงผิว พบว่าอิฐมีกำลังรับแรงอัดและการดูดซึมน้ำผ่านมาตรฐาน มอก.77-2545 [2] ทุกชั้นคุณภาพ และยังสามารถป้องกันความร้อนได้ดีกว่าอิฐมอลูแบบเผา ทั้งนี้ ยังมีวัสดุเหลือทิ้งอีกหลายชนิดที่มีการนำไปใช้เป็นส่วนผสมในวัสดุก่อสร้าง Osman et al. [3] ได้ศึกษาการใช้กากเฟอร์โรโครเมียม ซึ่งเป็นเศษเหลือจากการผลิตเฟอร์โรโครเมียมและซีโอไลต์ รวมถึงการผสมกันของวัสดุทั้งสองชนิดที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพ เชิงกล การนำความร้อน และโครงสร้างจุลภาคของอิฐ โดยกากเฟอร์โรโครเมียมและซีโอไลต์ถูกนำมาใช้แทนวัตถุดิบบางส่วนในอิฐ โดยส่วนผสมแบบกึ่งแห้งถูกอัดขึ้นรูปด้วยแรงดัน 20 เมกะปาสคาล จากนั้นตัวอย่างอิฐจะถูกเผาด้วยอัตราเพิ่มอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที จนถึง 900 องศาเซลเซียสและคงไว้เป็นเวลา 2 ชั่วโมง อิฐที่ผ่านการเผาถูกทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ ได้แก่ ความหนาแน่น ความพรุน การดูดซึมน้ำ การสูญเสียน้ำหนัก ความสามารถในการรับแรงอัดและแรงดัด ซึ่งพบว่าค่าความแข็งแรงเชิงกลของอิฐสูงกว่า 7 เมกะปาสคาล (71.3 กก/ตร.ซม.) และการนำความร้อนซึ่งลดลงถึงร้อยละ 42.3 นอกจากนี้ยังมีการวิเคราะห์

โครงสร้างจุลภาคและสมบัติของวัสดุ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าอิฐที่มีส่วนผสมของซีโอไลต์และกากเฟอร์โรโครเมียมสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุก่อสร้างได้ โดยมีคุณสมบัติที่ดีในการรับแรงและลดการนำความร้อน

ซีโอไลต์เป็นวัสดุที่มีซิลิกา (SiO_2) และอลูมินา (Al_2O_3) เป็นองค์ประกอบหลัก ศิรินุช [4] ซีโอไลต์ มีโครงสร้างเป็นผลึกไฮเดรตอะลูมิโนซิลิเกตที่มีรูพรุนแบบไมโคร และมีสมบัติของความเป็นขั้วลบอันเนื่องมาจากการไม่ดุลของประจุ Al^{3+} และ Si^{4+} ในโครงสร้าง ความเป็นขั้วลบในโครงสร้างซีโอไลต์จะถูกดุลด้วยการแลกเปลี่ยนไอออนของโลหะอัลคาไลและ/หรือไอออนอัลคาไลน์เอิร์ธ จึงทำให้ซีโอไลต์มีความเป็นกลางในธรรมชาติ อย่างไรก็ตามซีโอไลต์ยังพบว่ามีอยู่ทั้งในธรรมชาติและเกิดจากการสังเคราะห์ มีความเป็นผลึกและมีรูพรุนขนาดเล็ก ซีโอไลต์ถูกนำมาใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลาย เช่น ใช้เป็นวัสดุดูดซับ ตัวเร่งปฏิกิริยา และวัสดุแลกเปลี่ยนไอออน การทำน้ำให้บริสุทธิ์ การแยกก๊าซ การกลั่นปิโตรเคมี เป็นต้น ซีโอไลต์ที่ผ่านการใช้งานแล้วสามารถนำมารีไซเคิลหรือฟื้นฟูเพื่อใช้ซ้ำได้โดยผ่านกระบวนการล้างหรือรีเจนเนอเรชัน (Regeneration) โดยใช้ความร้อนหรือสารเคมีเพื่อคืนความสามารถในการดูดซับ นอกจากนี้ ยังสามารถนำซีโอไลต์ที่ผ่านการใช้งานแล้วไปใช้ประโยชน์ในด้านอื่นๆ เช่น ใช้เป็นส่วนผสมในคอนกรีต Perraki, Kontori, Tsvilis, และ Kakali [5] ได้ศึกษาผลของซีโอไลต์ต่อสมบัติและการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ผสม พบว่าซีโอไลต์เป็นแร่ชนิด Heulandite type-II ที่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุพอซโซลาน สามารถส่งเสริมการพัฒนากำลังอัดของซีเมนต์ผสมโดยช่วยในการใช้ประโยชน์จาก Ca(OH)_2 ที่เกิดจากการไฮเดรชันของซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และสามารถสร้างผลิตภัณฑ์ไฮเดรชันที่มีลักษณะคล้ายซีเมนต์ได้ โดยการเติมซีโอไลต์ไม่เกินร้อยละ 20 โดยน้ำหนักไม่มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อสมบัติกายภาพและทางกลของซีเมนต์ผสม ซีโอไลต์ยังใช้ในการปรับปรุงดินโดยช่วยควบคุมความชื้นและดูดซับสารอาหารสำหรับพืช คริษฐ์พล [6] ได้ทำการทำการศึกษา การผักกักน้ำอินทรีย์โดยใช้สารซีโอไลต์ พบว่าการผลิตผักกักน้ำอินทรีย์ที่ไม่ใช้สารซีโอไลต์ให้ผลผลิตต่ำกว่าผักกักน้ำอินทรีย์ที่ใส่สารซีโอไลต์ เป็นต้น

เนื่องจากซีโอไลต์มีซิลิกาและอลูมินาเป็นองค์ประกอบหลัก จึงมีความเป็นวัสดุพอซโซลาน Babak และ Mohammad [7] ได้ศึกษา การใช้ซีโอไลต์ธรรมชาติเป็นวัสดุซีเมนต์เสริม พบว่าซีโอไลต์ธรรมชาติมีความว่องไวทางพอซโซลานน้อยกว่าซิลิกาฟูม แต่ยังคงแสดงศักยภาพที่ดีในการเกิดปฏิกิริยาและการเสริมกำลังให้กับคอนกรีต โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อแทนที่ซีเมนต์ในสัดส่วนร้อยละ 15 สามารถให้กำลังอัดในระยะยาวเทียบเท่าหรือใกล้เคียงกับซิลิกาฟูมในสัดส่วนร้อยละ 10 ถึง 12.5 นอกจากนี้ การเติมซีโอไลต์ยังช่วยลดการซึมผ่านออกซิเจน การแพร่คลอไรด์ และการดูดซึมน้ำ รวมทั้งเพิ่มความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีต และเมื่อเติมในสัดส่วนร้อยละ 20 ถึง 40 ยังช่วยยับยั้งการขยายตัวที่ไดดีเทียบเท่าแล้ว โดยเมื่อนำซีโอไลต์ผสมกับปูนซีเมนต์และน้ำจะสามารถเกิดปฏิกิริยาพอซโซลานทำให้ซีเมนต์เพสต์มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น มีการนำซีโอไลต์ไปใช้ปรับปรุงดินร่วมกับปูนซีเมนต์ซึ่งพบว่า การปรับปรุงดินโดยใช้ซีโอไลต์ร่วมกับปูนซีเมนต์ทำให้ดินมีคุณสมบัติ (กำลังรับน้ำหนัก การซึมผ่านของน้ำ) ดีกว่าการปรับปรุงดินโดยใช้ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว MohammadReza et al. [8] กล่าวว่า การปรับปรุงพฤติกรรมของดินที่ถูกเสริมความแข็งแรงด้วยซีเมนต์ โดยการเพิ่มซีโอไลต์เป็นสารผสมเพิ่ม พบว่าซีโอไลต์สามารถใช้ร่วมกับซีเมนต์เพื่อเพิ่มความแข็งแรงและความทนทานของดิน การเพิ่มซีโอไลต์ช่วยเพิ่มค่าแรงอัดแกนเดียวของดิน (UCS) และลดการแตกร้าวของดินที่เสริมความแข็งแรงด้วยซีเมนต์ ดินที่ถูกเสริมความแข็งแรงด้วยซีเมนต์และซีโอไลต์จะมีความทนทานต่อการละลายและการเยือกแข็งได้ดีกว่าดินที่เสริมความแข็งแรงด้วยซีเมนต์เพียงอย่างเดียว จากงานวิจัยพบว่าปริมาณซีโอไลต์ที่เหมาะสมในการเสริมความแข็งแรงคือร้อยละ 3 โดยน้ำหนักของดินแห้ง เมื่อใช้ร่วมกับซีเมนต์ร้อยละ 6 Amin, Mahdi, และ Gholamali [9] ได้ทำการศึกษาเพื่อประเมินผลของการใช้ซีโอไลต์แทนซีเมนต์ในการปรับปรุงชั้นพื้นทางในการทดลองใช้ซีเมนต์เพียงร้อยละ 5 ในตัวอย่างควบคุม ขณะที่ในตัวอย่างอื่น ๆ ซีโอไลต์ถูกใช้แทนซีเมนต์ในสัดส่วนร้อยละ 20, 30, 40 และ 60 โดยน้ำหนักซีเมนต์ ผลการวิเคราะห์พบว่าตัวอย่างที่มีซีโอไลต์แทนซีเมนต์ร้อยละ 30 (หรือร้อยละ 1.5 ของวัสดุที่ใช้ทั้งหมด) ให้กำลังสูงที่สุดจาก

การบ่ม 28 วัน ซึ่งสูงกว่าตัวอย่างที่ไม่มีซีโอไลท์ถึงร้อยละ 29 การประเมินค่าการแตกร้าวของตัวอย่างพบว่าการใช้ซีโอไลท์แทนซีเมนต์ช่วยเพิ่มค่าการยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นร้อยละ 33 และเปลี่ยนพฤติกรรมของวัสดุจากลักษณะแข็งเปราะเป็นลักษณะยืดหยุ่นมากขึ้น Fahmida และ Abdullah [10] ได้ทำการวิจัยเพื่อศึกษาผลของการเติมเถ้าแกลบต่อคุณสมบัติของอิฐที่ทำจากดินจากเมืองซิลเฮตในประเทศบังคลาเทศ โดยมีเป้าหมายเพื่อหาสัดส่วนของเถ้าแกลบที่เหมาะสมในการใช้ผลิตอิฐ รวมถึงศึกษาผลกระทบของเถ้าแกลบต่อการดูดซึมน้ำ ความสามารถในการรับแรงอัด การหดตัว ความหนาแน่น และคุณสมบัติการนำความร้อนของอิฐ ในการทดลองได้ใช้เถ้าแกลบแทนดินในอิฐในสัดส่วนร้อยละ 5 ถึง 20 โดยน้ำหนัก ผลการศึกษาพบว่าการดูดซึมน้ำของอิฐเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนเถ้าแกลบที่เพิ่มขึ้น โดยอิฐที่มี เถ้าแกลบร้อยละ 5 มีค่าการดูดซึมน้ำต่ำสุดที่ร้อยละ 17.8 ในขณะที่อิฐที่มีเถ้าแกลบร้อยละ 20 มีค่าการดูดซึมน้ำสูงสุดที่ร้อยละ 21.33 นอกจากนี้ยังพบว่าอิฐที่มีเถ้าแกลบร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของดินแห้ง มีค่าความสามารถในการรับแรงอัดสูงสุดอยู่ที่ 8.401 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร มีความหนาแน่นสูงสุดที่ 1676.395 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และมีค่าการนำความร้อนสูงสุดที่ 0.584 วัตต์ต่อเมตร-เคลวิน การวิจัยยังแสดงให้เห็นว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและการหดตัว อย่างมีนัยสำคัญในอิฐทุกตัวที่มีเถ้าแกลบโดยค่าการหดตัวอยู่ที่ร้อยละ 14.28 ผลจากการศึกษาสรุปได้ว่าเถ้าแกลบในสัดส่วนร้อยละ 5 ถือเป็นปริมาณที่เหมาะสมเมื่อผสมกับดิน สามารถใช้ทดแทนดินสำหรับผลิตอิฐได้

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาคูณสมบัติของอิฐมอญที่ไม่ผ่านการเผา โดยนำดินลูกรังผสมกับปูนซีเมนต์ในอัตราส่วน 1 ต่อ 6 และใช้ซีโอไลท์เหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 0, 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 โดยน้ำหนัก อัดขึ้นรูป และทำการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมรวมทั้งวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของวัสดุส่วนผสมและอิฐมอญที่อัดขึ้นรูปแล้วเพื่อให้เข้าใจถึงพฤติกรรมในระดับจุลภาคที่ส่งผลต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรม

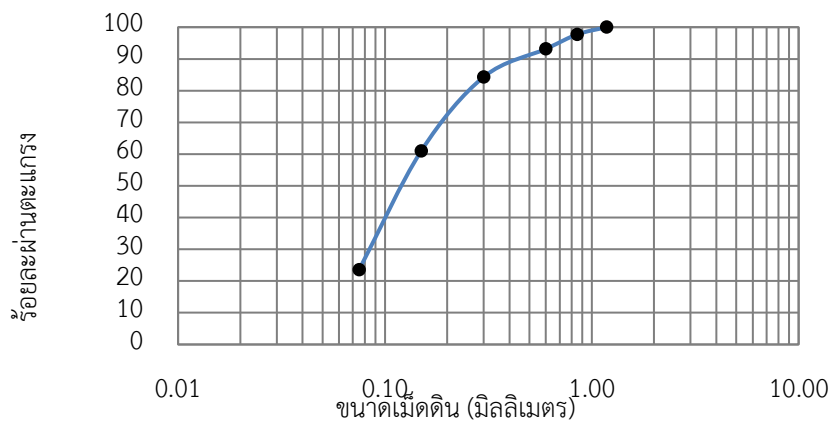
วิธีการวิจัย

วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

วัสดุที่ใช้เป็นส่วนผสมของอิฐมอญในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก ดินลูกรัง ซีโอไลท์ และน้ำประปา โดยดินลูกรังนำมาจากโรงงานผลิตบล็อกประสานในท้องถิ่น ลักษณะของดินมีสีแดงส้มแดงสภาพที่ 1 นำมาอบให้แห้งและร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 16 จากการวิเคราะห์การกระจายขนาดของเม็ดดินด้วยวิธีร่อนตะแกรงได้ผลดังแสดงภาพที่ 2 ซึ่งจะเห็นว่าขนาดของเม็ดดินส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 0.075 ถึง 0.3 มิลลิเมตร เมื่อจำแนกชนิดของดินด้วยระบบ USCS พบว่าเป็นดินทรายปนตะกอน (SM) คุณสมบัติพื้นฐานของดินสรุปได้ดังตารางที่ 1



ภาพที่ 1 ดินลูกรังที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 16



ภาพที่ 2 แผนภูมิการกระจายขนาดของเม็ดดิน

ตารางที่ 1 คุณสมบัติพื้นฐานของดินลูกรัง

คุณสมบัติดิน	ผลการทดลอง
ความถ่วงจำเพาะ	2.64
ขีดจำกัดของเหลว	37.1
ขีดจำกัดพลาสติก	20.9
ดัชนีความเป็นพลาสติก	16.2
จำแนกดินแบบ (USCS)	SC

ซีโอไลท์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นซีโอไลท์ชนิดเม็ดที่เหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม มีสีขาวปนเทา ผิวเกลี้ยง มีความแข็ง ไม่แตกง่าย ไม่ละลายน้ำ มีขนาดอยู่ในช่วง 3.5 ถึง 4.5 มิลลิเมตรและความถ่วงจำเพาะอยู่ที่ 2.015 นำมาบดให้ละเอียดและร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 (เล็กกว่า 0.075 มม.) จะได้ซีโอไลท์ที่มีลักษณะเป็นผงดังแสดงภาพที่ 3 จากการทดสอบการดูดซึมน้ำโดยนำซีโอไลท์ไปแช่น้ำเป็นระยะเวลาไม่น้อยกว่า 72 ชั่วโมง และนำมาอบให้แห้ง แล้วคำนวณหาการดูดซึมน้ำได้เท่ากับร้อยละ 22.5

องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก ดินลูกรัง และซีโอไลท์ จากการวิเคราะห์ด้วยวิธี X-ray fluorescence (XRF) แสดงตารางที่ 2 ซึ่งจะเห็นว่า สารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก คือ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) และซิลิกา (SiO_2) ส่วนสารประกอบหลักในซีโอไลท์ คือ ซิลิกาและอลูมินา (Al_2O_3)



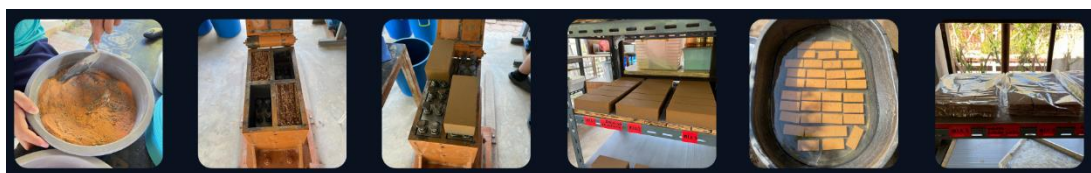
ภาพที่ 3 ซีโอไลท์เหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมผ่านการบดละเอียดและร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก และซีโอไลท์ จากการวิเคราะห์ด้วยวิธี X-ray fluorescence (XRF)

สารประกอบ	ร้อยละโดยมวล	
	ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก	ซีโอไลท์
SiO ₂	23.942	57.917
Al ₂ O ₃	4.446	27.793
CaO	59.317	0.679
Fe ₂ O ₃	3.220	0.980
K ₂ O	0.410	0.159
SO ₃	5.179	0.208
MgO	2.687	-
Na ₂ O	-	12.058

วิธีการศึกษา

ส่วนผสมที่ใช้อัดขึ้นรูปอิฐมอญใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก 1 ส่วน ดินลูกรัง 6 ส่วน และน้ำ 0.7 ส่วน โดยน้ำหนัก และใช้ซีโอไลท์บดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 0, 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 โดยน้ำหนัก รวมทั้งสิ้นจำนวน 7 ส่วนผสม นำส่วนผสมมาอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดแบบมือโยกให้เป็นก้อนขนาด 65 มม. x 140 มม. x 40 มม. (ขนาดตามที่กำหนดในมาตรฐาน มอก.77-2545) ในการอัดขึ้นรูปจะควบคุมความหนาแน่นแห้งให้เท่ากันหรือใกล้เคียงกันทุกก้อน คือ 1.7 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร โดยประมาณดังแสดงภาพที่ 4 ลักษณะของตัวอย่างอิฐมอญที่อัดขึ้นรูปแล้วดังแสดงภาพที่ 5



ผสมส่วนผสม → นำเข้าเครื่องอัด → ดันออกจากแบบ → พักไว้ในที่ร่ม → แช่น้ำ 5 นาที → บ่ม 28 วัน

ภาพที่ 4 ขั้นตอนการผลิตอิฐมอญแบบไม่เผา



ภาพที่ 5 อิฐมอญที่อัดขึ้นรูปขนาด 65 มม. x 140 มม. x 40 มม.

เมื่ออัดขึ้นรูปอิฐมอญเสร็จแล้ว นำไปวางพักไว้ในที่ร่มเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้น นำไปบ่มด้วยการนำไปแช่น้ำเป็นเวลา 2 นาที่ นำขึ้นจากน้ำและวางพักไว้ให้สะเด็ดน้ำแล้วห่อด้วยพลาสติก จนครบอายุการทดสอบ ในเบื้องต้นได้มีการตรวจสอบความคลาดเคลื่อนของขนาดก้อนอิฐ (ขนาด 65 มม. x 140 มม. x 40 มม.) เมื่ออายุผ่านไป 28 วันพบว่า ตัวอย่างอิฐทุกส่วนผสมยังมีขนาดเท่าเดิม แสดงให้เห็นว่าอิฐมอญไม่เกิดการหดตัวหลังจากการผลิต จึงไม่มีปัญหาเรื่องความคลาดเคลื่อนของขนาด

การทดสอบกำลังรับแรงอัดทำตามมาตรฐาน มอก.243-2520 [11] โดยนำตัวอย่างอิฐมอญไปกดด้วยเครื่องทดสอบกำลังอัดจนวิบัติและคำนวณหาลังรับแรงอัดดังสมการที่ (1)

$$\text{กำลังรับแรงอัด (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)} = \frac{P}{A} \quad (1)$$

เมื่อ P คือ แรงกดสูงสุดที่ก้อนตัวอย่างรับได้ (กิโลกรัม) และ A คือ พื้นที่รับแรงอัดของก้อนตัวอย่าง (ตารางเซนติเมตร) ดังแสดงภาพที่ 6



ภาพที่ 6 การทดสอบกำลังอัดของอิฐมอญ

การทดสอบการดูดซึมน้ำทำตามมาตรฐาน มอก.243-2520 โดยนำตัวอย่างอิฐไปแช่น้ำเป็นระยะเวลา 48 ชั่วโมง นำขึ้นจากน้ำและใช้ผ้าที่ชุบน้ำและบิดพอหมาดๆ ชุบน้ำบริเวณผิวออก นำไปชั่งน้ำหนัก จากนั้น นำไปอบให้แห้งสนิทที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสและนำไปชั่งน้ำหนัก การดูดซึมน้ำสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (2)

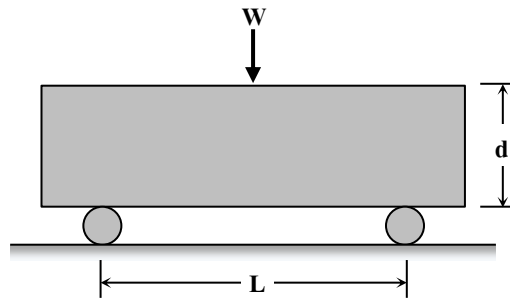
$$\text{การดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)} = \frac{W_1 - W_2}{W_2} \times 100 \quad (2)$$

เมื่อ W_1 คือ น้ำหนักหลังแช่น้ำของก้อนตัวอย่าง (กิโลกรัม) W_2 คือ น้ำหนักอบแห้งของก้อนตัวอย่าง (กิโลกรัม)

การทดสอบโมดูลัสการแตกร้าวทำตามมาตรฐาน มอก.243-2520 โดยวางก้อนตัวอย่างลงบนจุดรองรับที่เป็นแท่งทรงกระบอกกลมโดยให้ก้อนตัวอย่างอยู่ในแนวนอนดังแสดงภาพที่ 7 นำแท่งทรงกระบอกกลมอีกอันหนึ่งวางด้านบนของก้อนตัวอย่างที่ตำแหน่งกึ่งกลาง แล้วใช้แรงกดจากเครื่องกดลงบนแท่งดังกล่าวซึ่งจะทำให้เกิดแรงกระทำกับก้อนตัวอย่างลงตามแนวกึ่งกลาง กดจนกระทั่งก้อนตัวอย่างวิบัติแล้วทำการคำนวณหาค่าโมดูลัสการแตกร้าวดังสมการที่ (3)

$$\text{โมดูลัสแตกหัก (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)} = \frac{3WL}{2bd^2} \quad (3)$$

เมื่อ W คือ แรงกดสูงสุดจากเครื่องทดสอบ (กิโลกรัม) L คือ ระยะห่างระหว่างแท่งรองรับ (เซนติเมตร) b คือ ความกว้างของก้อนตัวอย่าง (เซนติเมตร) และ d คือ ความหนาของก้อนตัวอย่าง (เซนติเมตร)



ภาพที่ 7 โมดูลัสการแตกหัก

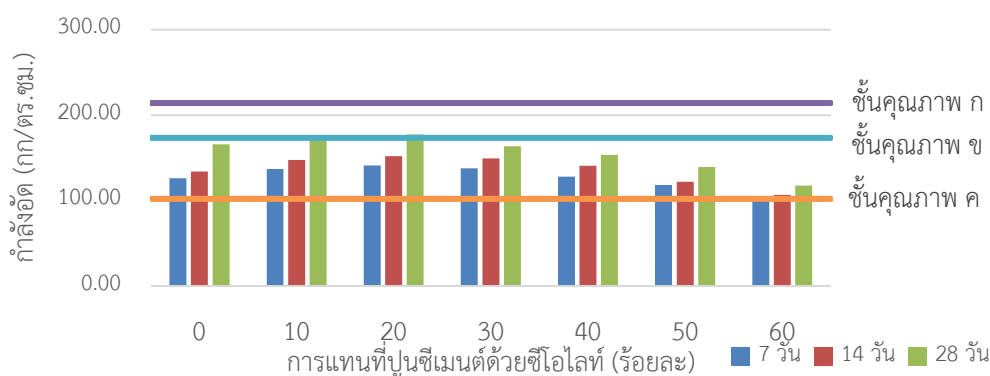
ผลการศึกษา

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด

จากการทดสอบกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างอิฐมอญ ขนาด 65 มม. x 140 มม. x 40 มม. ที่อายุ 7, 14, และ 28 วันดังแสดงตารางที่ 3 โดยเป็นค่าเฉลี่ยจากอิฐมอญ 5 ก้อน ได้ผลดังแสดงภาพที่ 8 จะเห็นว่า ในช่วงการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซีโอไลท์ไม่เกินร้อยละ 20 กำลังรับแรงอัดมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณซีโอไลท์ และเมื่อการแทนที่มากกว่าร้อยละ 20 กำลังรับแรงอัดมีค่าลดลง โดยการแทนที่ร้อยละ 20 ให้กำลังรับแรงอัดสูงสุดในทุกส่วนผสมโดยมีกำลังอัดเฉลี่ยอยู่ที่ 177.4 กก./ตร.ซม. ที่อายุ 7 และ 14 วัน กำลังรับแรงอัดของส่วนผสมที่ใช้ซีโอไลท์แทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 มีค่าสูงกว่าส่วนผสมที่ไม่มีซีโอไลท์ แต่ที่อายุ 28 วัน มีเพียงส่วนผสมที่ใช้ซีโอไลท์แทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 และ 20 ที่มีกำลังรับแรงอัดสูงกว่าส่วนผสมที่ไม่มีซีโอไลท์ ส่วนผสมที่ใช้ซีโอไลท์แทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 และ 20 มีกำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วันผ่านมาตรฐาน มอก.77-2565 ของชั้นคุณภาพ ข และทุกส่วนผสม มีกำลังรับแรงอัดตั้งแต่อายุ 7 วันขึ้นไปผ่านมาตรฐาน มอก.77-2565 ของชั้นคุณภาพ ค

ตารางที่ 3 ค่ากำลังอัดของอิฐมอญ

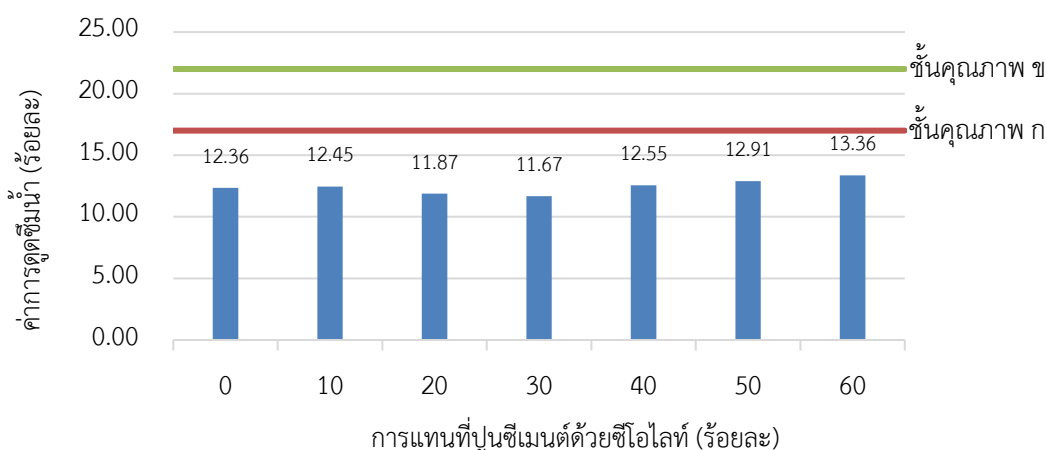
การแทนที่ ปูนซีเมนต์ด้วยซีโอไลท์	กำลังอัด (กก./ตร.ซม.)		
	7 วัน	14 วัน	28 วัน
0	126.204	133.824	165.988
10	136.834	147.508	174.198
20	141.118	152.034	177.402
30	137.895	149.22	163.435
40	127.962	140.882	153.507
50	118.346	121.940	139.210
60	101.164	106.606	117.338



ภาพที่ 8 กำลังอัดของอิฐ

ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำ

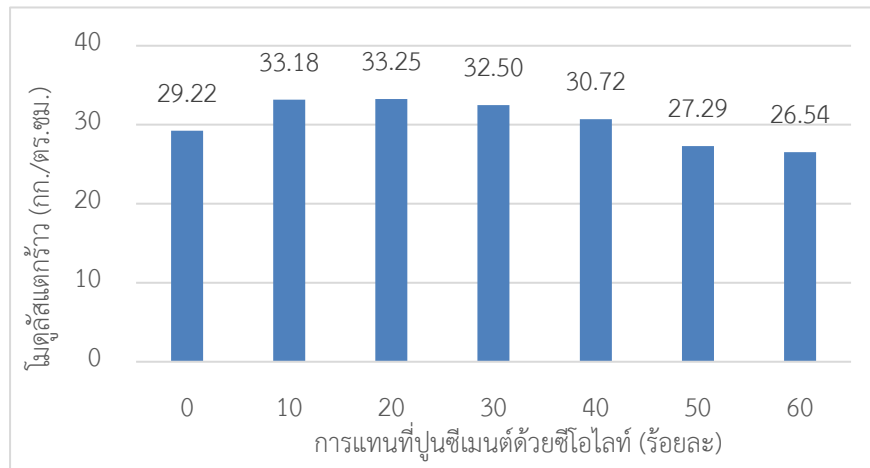
เนื่องจากซิลิกาประกอบด้วยซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) ในปริมาณสูง ซึ่งทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) จากการไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ ปฏิกิริยานี้จะสร้าง แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และ แคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต (C-A-H) ซึ่งเป็นสาระสำคัญในการให้กำลังอัดแก่คอนกรีต อย่างไรก็ตามซิลิกาที่มีความพรุนจะทำให้กำลังของอิฐลดลงและมีการดูดซึมน้ำมากขึ้นเมื่อผสมซิลิกามากเกินไป ภาพที่ 9 แสดงการดูดซึมน้ำเฉลี่ยของตัวอย่างอิฐมอดู 5 ก่อน ที่อายุ 28 วัน ซึ่งจะเห็นว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิการ้อยละ 10 ถึง 30 ทำให้การดูดซึมน้ำมีแนวโน้มลดลง โดยส่วนผสมที่มีซิลิการ้อยละ 20 และ 30 มีการดูดซึมน้ำน้อยกว่าส่วนผสมที่ไม่มีซิลิกา และเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิการ้อยละ 40 ถึง 60 การดูดซึมน้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณซิลิกาซึ่งค่าดูดซึมน้ำน้อยที่สุดคือการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิการ้อยละ 30 มีค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ 11.67 และการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิการ้อยละ 60 มีค่าการดูดซึมน้ำมากที่สุดคือร้อยละ 13.36 ทั้งนี้ การดูดซึมน้ำของทั้ง 7 ส่วนผสมมีไม่แตกต่างกันมาก จึงกล่าวได้ว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาไม่เกินร้อยละ 30 ช่วยลดการดูดซึมน้ำได้ ส่วนการแทนที่ในปริมาณมากกว่าร้อยละ 40 ทำให้ค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น การดูดซึมน้ำมีความสอดคล้องกับคุณสมบัติด้านกำลังทั้งกำลังรับแรงอัดและโมดูลัสแตกร้าว กล่าวคือ ส่วนผสมที่มีกำลังอัดและโมดูลัสแตกร้าวสูงจะมีค่าการดูดซึมน้ำต่ำ เมื่อพิจารณาตามฐานมอก.77-2565 พบว่า ทุกส่วนผสมมีการดูดซึมน้ำผ่านเกณฑ์ชั้นคุณภาพ ก และ ข



ภาพที่ 9 การดูดซึมน้ำเฉลี่ยของตัวอย่างอิฐมอดู 5 ที่อายุ 28 วัน

ผลการทดสอบโมดูลัสแตกร้าว

โมดูลัสแตกร้าวของอิฐมอญที่อายุ 28 วันของส่วนผสมต่างๆ แสดงดังแสดงภาพที่ 10 ส่วนผสมที่ใช้ซีโอไลท์แทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 ถึง 40 มีโมดูลัสแตกร้าวมากกว่าส่วนผสมที่ไม่มีซีโอไลท์ และส่วนผสมที่ใช้ซีโอไลท์แทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 50 ถึง 60 มีโมดูลัสแตกร้าวน้อยกว่าส่วนผสมที่ไม่มีซีโอไลท์เพียงเล็กน้อย โมดูลัสแตกร้าวมีแนวโน้มที่สอดคล้องกับกำลังรับแรงอัด โดยส่วนผสมที่มีกำลังรับแรงอัดสูงมีค่าโมดูลัสแตกร้าวสูงเช่นเดียวกัน โมดูลัสแตกร้าวเป็นค่าที่แสดงถึงกำลังรับแรงดัดหรือความทนทานต่อการแตกหักเมื่อได้รับแรงกระแทก ดังนั้น การผสมซีโอไลท์แทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 ถึง 40 สามารถช่วยลดการแตกหักของอิฐมอญแบบไม่เผาได้



ภาพที่ 10 ค่าโมดูลัสแตกร้าวของอิฐมอญที่อายุ 28 วัน

ผลการทดลองนำไปก่อและฉาบ

จากการนำอิฐมอญแบบไม่เผาไปทดลองก่อผนังขนาด 0.4 ม. x 0.6 ม. พร้อมทั้งฉาบผิวดังแสดงภาพที่ 11 โดยใช้ปูนซีเมนต์ผสมซึ่งเป็นปูนสำหรับก่อและฉาบ ผสมน้ำตามอัตราส่วนที่ผู้ผลิตแนะนำ (ปูนซีเมนต์ 5 ส่วนต่อน้ำ 1 ส่วน โดยน้ำหนัก) ตัวอย่างอิฐที่ใช้ก่อผนังมีการนำไปแช่น้ำให้อิ่มตัวตามเทคนิคที่ปฏิบัติกันในการก่อผนังทั่วไป พบว่าในการก่อผนัง ก้อนอิฐกับปูนซีเมนต์มีการยึดเกาะกันได้ดี และในการฉาบ ปูนซีเมนต์สามารถยึดเกาะกับก้อนอิฐได้ดี คือ ปูนซีเมนต์ไม่หลุดร่วงจากก้อนอิฐ เมื่อทิ้งไว้ครบ 1 สัปดาห์ไม่มีรอยแตกร้าวเกิดขึ้น



การก่อ



การฉาบ

ภาพที่ 11 การทดลองนำอิฐมอญแบบไม่เผาไปก่อและฉาบ

หากพิจารณากำลักรับแรงอัดและการดูดซึมน้ำที่อายุ 28 วันเปรียบเทียบกับเกณฑ์ที่กำหนดในมาตรฐาน มอก. 77-2565 รวมถึงการที่สามารถใช้ประโยชน์จากซีโอไลท์ได้สูงสุด จะได้ว่า ส่วนผสมที่แนะนำของอิฐชั้นคุณภาพ ข และ ค คือ ส่วนผสมที่ใช้ซีโอไลท์แทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 และ 60 ตามลำดับ กล่าวได้ว่า ซีโอไลท์สามารถนำมาใช้เป็น ส่วนผสมในอิฐมอญแบบไม่เผาด้วยการแทนที่ปูนซีเมนต์ได้ในปริมาณที่สูงมาก คือ แทนที่ปูนซีเมนต์ได้ถึงร้อยละ 60 ตาราง ที่ 4 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของอิฐมอญแบบไม่เผาของส่วนผสมที่แนะนำกับอิฐมอญดั้งเดิมที่ผ่านการเผา จะเห็น ว่า อิฐมอญแบบไม่เผามีคุณสมบัติที่เหนือกว่าอิฐมอญดั้งเดิมในด้านกำลังรับแรงอัด การดูดซึมน้ำ โมดูลัสแตกร้าว และ ขนาดคลาดเคลื่อน แต่มีความหนาแน่นและที่ด้อยกว่า ส่วนการนำความร้อนมีค่าใกล้เคียงกัน ทั้งนี้ การพัฒนาคุณสมบัติ ของอิฐมอญแบบไม่เผาที่ผสมซีโอไลท์ให้ดีขึ้น จนกระทั่งสามารถผ่านเกณฑ์มาตรฐาน มอก.77-2565 ชั้นคุณภาพ ก เป็นสิ่ง น่าสนใจที่จะศึกษาวิจัยต่อไปในอนาคต

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของอิฐมอญแบบไม่เผาของส่วนผสมที่แนะนำกับอิฐมอญดั้งเดิมที่ผ่านการเผา

คุณสมบัติ	อิฐมอญแบบไม่เผา (28 วัน)	อิฐมอญดั้งเดิม	มอก. 77-2565
ค่ากำลังอัด	177.4 (ซีโอไลท์ร้อยละ 20)	26.4 ถึง 141.2 [12]	173 (ชั้นคุณภาพ ข.)
(กก/ตร.ซม.)	117.3 (ซีโอไลท์ร้อยละ 60)		102 (ชั้นคุณภาพ ค.)
ค่าดูดซึมน้ำ	11.9 (ซีโอไลท์ร้อยละ 20)	13.5 ถึง 17.7 [12]	22 (ชั้นคุณภาพ ข.)
(ร้อยละ)	13.4 (ซีโอไลท์ร้อยละ 60)		
โมดูลัสแตกหัก (กก/ตร.ซม.)	33.3 (ซีโอไลท์ร้อยละ 20)	5.5 ถึง 11.5 [12]	ไม่กำหนด
	26.5 (ซีโอไลท์ร้อยละ 60)		
ความคลาดเคลื่อน (มม.)	ไม่เกิน 0.7	1.0 ถึง 9.5 [12]	± 2 ถึง ± 5
ความหนาแน่น(กก./ลบ.ม)	1.700 ± 0.01	1.255 ถึง 1.389 [12]	ไม่กำหนด

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้พัฒนาอิฐมอญแบบไม่เผาที่มีส่วนผสมของซีโอไลท์เหลือทิ้ง โดยใช้ดินลูกรังผสมกับปูนซีเมนต์ใน อัตราส่วน 1:6 และนำซีโอไลท์แทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 0, 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 โดยน้ำหนัก ทำการทดสอบ คุณสมบัติทางวิศวกรรมได้แก่ กำลังรับแรงอัดที่อายุ 7, 14 และ 28 วัน การดูดซึมน้ำ โมดูลัสแตกร้าว ความคลาดเคลื่อน ของขนาด และการนำความร้อนที่อายุ 28 วัน จากการศึกษาพบว่า การใช้ซีโอไลท์แทนที่ปูนซีเมนต์สามารถปรับปรุง คุณสมบัติของอิฐมอญได้ โดยช่วยให้กำลังรับแรงอัดและโมดูลัสแตกร้าวเพิ่มขึ้น การดูดซึมน้ำลดลง ส่วนผสมที่แนะนำซึ่งมี คุณสมบัติผ่านมาตรฐาน มอก.77-2565 และประหยัดปูนซีเมนต์ได้มากที่สุดได้แก่ส่วนผสมที่ใช้ซีโอไลท์แทนที่ปูนซีเมนต์ ร้อยละ 20 (สำหรับอิฐชั้นคุณภาพ ข) และส่วนผสมใช้ซีโอไลท์แทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 60 (สำหรับอิฐชั้นคุณภาพ ค) เมื่อ เปรียบเทียบคุณสมบัติของอิฐมอญแบบไม่เผาที่ผสมซีโอไลท์กับอิฐมอญดั้งเดิมพบว่า อิฐมอญแบบไม่เผามีกำลังรับแรงอัด โมดูลัสแตกร้าว และการดูดซึมน้ำที่เหนือกว่าอิฐมอญดั้งเดิม แต่มีความหนาแน่นสูงกว่า กล่าวได้ว่า อิฐมอญแบบไม่เผา สามารถนำมาใช้ทดแทนอิฐมอญดั้งเดิมได้ และสามารถนำซีโอไลท์เป็นส่วนผสมในการผลิตอิฐมอญแบบไม่เผาได้ ซึ่ง นอกจากจะเป็นการนำวัสดุเหลือทิ้งมาใช้ให้เกิดประโยชน์อันเป็นการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ลดต้นทุนในการผลิตแล้ว ซีโอไลท์ยังสามารถช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของอิฐมอญแบบไม่เผาให้ดีขึ้นได้อีกด้วย

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่สนับสนุนทุนในการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

1. Chanphet N. Improvement the quality of bricks without burn with straw fiber in central region for sustainable commercial use. Ayutthaya: Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi, Faculty of Engineering and Architecture, Civil Engineering Program; 2019. Thai.
2. Thai Industrial Standards Institute. TIS 77-2565: Building bricks. Bangkok: Ministry of Industry; 2022. Thai.
3. Gencil O, Sutcu M, Erdogmus E, Koc V, Veli Cay V, Sabri Gok M. Properties of bricks with waste ferrochromium slag and zeolite. *J Clean Prod.* 2013;59:111-9.
4. Loiha S. Zeolite and zeolite technology. *KKU Sci J.* 2013;41(1):56-66.
5. Perraki T, Kontori E, Tsivilis S, Kakali G. The effect of zeolite on the properties and hydration of blended cements. *Cem Concr Compos.* 2010;32(2):128-33. doi:10.1016/j.cemconcomp.2009.10.004
6. Nuphrom K. Organic kang kong production by using zeolite. *Creative Agriculture Journal.* 2016:162-6. Thai.
7. Ahmadi B, Shekarchi M. Use of natural zeolite as a supplementary cementitious material. *Cem Concr Compos.* 2010;32(2):134-41. doi:10.1016/j.cemconcomp.2009.10.006
8. ShahriarKian M, Kabiri S, Bayat M. Utilization of zeolite to improve the behavior of cement-stabilized soil. *Int J Geosynth Ground Eng.* 2021;7:35. doi:10.1007/s40891-021-00284-9
9. Sheikh A, Akbari M, Shafabakhsh G. Laboratory study of the effect of zeolite and cement compound on the unconfined compressive strength of a stabilized base layer of road pavement. *Materials (Basel).* 2022;15(22):7981. doi:10.3390/ma15227981
10. Ania FM, Nahid AM. Development of brick by utilizing rice husk ash as the partial replacement for clay. *Multidiscip Sci J.* 2023;5:e2023004. doi:10.31893/multiscience.2023004
11. Thai Industrial Standards Institute. TIS 243-2520: Standard method of sampling and testing brick and structural clay tile. Bangkok: Ministry of Industry; 1977. Thai.
12. Nokkaew K, Phaikaew S, Harnchai K, Meethum M, Sooksil N. Quality evaluation of Mon brick produced in Sanuk Group Province. In: *Proceedings of the 27th National Convention on Civil Engineering (NCCE27); 2022 Aug 24-6; Chiang Rai, Thailand.* Bangkok: Engineering Institute of Thailand; 2022. p. MAT04-1-7. Thai.