

การนำเศษเหลือจากอุตสาหกรรมการเกษตรมาใช้ประโยชน์ในการผลิตอิฐดินเหนียวอบด้วยอุณหภูมิต่ำ Applied the Residues of Agricultural Industry to Product Clay Brick at Low-temperature

วัชระ ศรีสะเกษ¹ กิตติ เขาวนะ² นุอนันท์ คุระแก้ว³ และ ธนันท์ ชูอุปการ^{4,*}

^{1,3} สาขาเทคโนโลยีวิศวกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย จ.ตรัง

² สาขาวิชาการศึกษาทั่วไป สำนักวิชาพหุภาษาและการศึกษาทั่วไป มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ จ.นครศรีธรรมราช

⁴ ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ จ.สงขลา

*Corresponding author; E-mail address: tanan.c@psu.ac.th

บทคัดย่อ

การผลิตอิฐแบบดั้งเดิมต้องใช้ความร้อนสูง และในพื้นที่ที่มีเศษเหลือจากอุตสาหกรรมการเกษตรที่เป็นแหล่งกำเนิดมลพิษในรูปของเถ้าลอยซึ่งส่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อม งานวิจัยนี้ศึกษาการผลิตอิฐดินเหนียวอบด้วยอุณหภูมิต่ำด้วยเทคโนโลยีการกระตุ้นด้วยด่าง โดยใช้วัสดุตั้งต้นได้แก่ เถ้าปาล์มและเถ้าไม้ยางพาราซึ่งเป็นเศษเหลือจากอุตสาหกรรมการเกษตรและดินเหนียวซึ่งเป็นวัสดุธรรมชาติ ออกแบบส่วนผสมวัสดุสามชนิดเพื่อให้ได้องค์ประกอบอลูมินาและซิลิกาที่เหมาะสมสำหรับการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี จากนั้นผสมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ และทั้งสองชนิดผสมกันความเข้มข้น 15 โมลาร์ ตัวอย่างขนาด 5x5x5 ลูกบาศก์เซนติเมตรถูกอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 วัน ทดสอบกำลังรับแรงอัดของอิฐที่บ่มในอากาศ 7 14 และ 28 วัน สุดท้ายนำมาเปรียบเทียบกับอิฐที่เผาด้วยวิธีดั้งเดิม ผลการศึกษาพบว่าอิฐดินเหนียวอบด้วยอุณหภูมิต่ำสามารถปรับปรุงคุณสมบัติให้ได้กำลังรับแรงอัดสูงสุด 262.38 ksc ซึ่งสูงกว่าการเผาด้วยวิธีดั้งเดิม การผสมเถ้ามากขึ้นทำให้กำลังรับแรงอัดและความหนาแน่นลดลง อิฐดินเหนียวอบด้วยอุณหภูมิต่ำไม่หดตัวและไม่ละลายน้ำ บ่งบอกว่ามีโครงสร้างแข็งแรงเทียบเท่าอิฐเผาที่อุณหภูมิสูง สามารถเป็นทางเลือกในการพัฒนาอิฐเพื่อใช้ในโรงงานสถาปัตยกรรมได้อย่างน่าสนใจและประหยัดพลังงานซึ่งเป็นต้นทุนที่สำคัญและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

คำสำคัญ: อิฐดินเหนียว, อิฐดินเหนียวอบด้วยอุณหภูมิต่ำ, เถ้าปาล์ม, เถ้าไม้ยางพารา, เทคโนโลยีการกระตุ้นด้วยด่าง

Abstract

The production of traditional bricks requires a lot of heat. In areas where agricultural waste is a source of pollution in the form of fly ash, it negatively affects the environment. This research is to study the production of clay bricks at low-temperatures using alkali-activation technology. The starting materials include palm ash and para-wood ash, which are

leftovers from the agricultural industry, and clay, a natural material. Three material combinations were designed to obtain the optimal alumina and silica composition for the chemical reaction. It was then mixed with a solution of sodium hydroxide, potassium hydroxide, and the two mixtures at 15 molar concentrations. The 5x5x5 cm³ sample was incubated at 80°C for 2 days. The compressive strength of bricks is studied at cured in the air for 7, 14, and 28 days. Finally, it is compared with bricks burnt traditionally. The results showed that the clay brick at low-temperature improved their properties to achieve a maximum compressive strength of 262.38 ksc, which was higher than clay bricks traditionally burned. More ash blending results in lower compressive strength and density. The clay brick at low temperature does not shrink and does not melt. Indicates that the structure is as strong as bricks burned at high temperatures. It can be an alternative to developing bricks for interesting architectural applications and saving energy, which is a high cost and environmentally friendly.

Keywords: clay brick, clay brick at low-temperature, palm ash, para-wood ash, alkali-activation technology

1. ที่มาและความสำคัญ

ประเทศไทยเป็นแหล่งเกษตรกรรมที่มีพื้นที่เพาะปลูกประมาณ 321 ล้านไร่ทำให้มีวัสดุเหลือทิ้งจากภาคการเกษตรจำนวนมาก การจัดการวัสดุพลอยได้จากอุตสาหกรรมเกษตรยังคงเป็นประเด็นที่ควรให้ความสำคัญและได้รับการจัดการอย่างจริงจัง เพื่อลดการนำวัสดุพลอยได้มากองทิ้งในที่โล่งและส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อม ในปัจจุบันได้พยายามนำวัสดุพลอยได้จาก การเกษตรมาใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมวัสดุก่อสร้างด้วยการนำเถ้าลอย (fly ash) ซึ่งเกิดจากกระบวนการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์และมีปริมาณสูงถึงร้อยละ 80-85 ของเถ้าที่เกิดขึ้นทั้งหมดมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

บางส่วน เช่น เถ้าขานอ้อย [1-2] เถ้าแกลบ [3] เถ้าปาล์ม [4] และเถ้าไม้ยางพารา [5-6]

พืชเศรษฐกิจที่สำคัญ 5 อันดับแรกของประเทศไทย คือ ข้าว มันสำปะหลัง อ้อย ยางพารา และปาล์มน้ำมัน ในปี 2564 ประเทศไทยมีผลผลิตปาล์มน้ำมัน 16.8 ล้านตัน และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทุกปี [7] ส่งผลให้มีเถ้าปาล์มที่ต้องนำไปทิ้งมีมากกว่าปะละ 100,000 ตันต่อปี เถ้าปาล์มเป็นผลพลอยได้จากการเผาทะยอก เส้นใย และทะยอกของปาล์มน้ำมันเพื่อเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้าและการต้มผลปาล์มดิบเพื่อสกัดน้ำมันปาล์ม เถ้าปาล์มมีลักษณะเป็นผงฝุ่น น้ำหนักเบา สามารถฟุ้งกระจายได้ง่าย ซึ่งเป็นปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้มีผลพลอยได้ทางการเกษตรที่มีแนวโน้มเป็นปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมอีกชนิด คือ เถ้าไม้ยางพาราซึ่งเป็นวัสดุพลอยได้จากการผลิตกระแสไฟฟ้า เกิดจากการนำไม้ยางพาราที่ไม่สามารถให้ผลผลิตได้มาแปรรูปเป็นเฟอร์นิเจอร์และนำเศษไม้ที่เหลือไปใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวล ในการผลิตกระแสไฟฟ้า 22 เมกะวัตต์ต้องใช้เศษไม้ยางพาราจำนวน 15 ตัน ส่งผลให้มีเถ้าเกิดขึ้นหลังกระบวนการเผาไหม้จำนวนมาก [8] และก่อให้เกิดปัญหาในการกำจัด

อิฐมอญ (brick) หรือเรียกอีกอย่างว่าอิฐแดง ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ อิฐก่อสร้างสามัญ [9] และอิฐกลางก่อแผงไม่รับน้ำหนัก [10] เป็นผลิตภัณฑ์เซรามิกชนิดหนึ่งผลิตมาจากดินเหนียว หินหรือแกลบ และน้ำผสมกันนำไปใส่ในแบบพิมพ์อัดเป็นก้อนทิ้งไว้ให้แห้งในอากาศก่อนนำไปเผาที่อุณหภูมิสูงกว่า 800 ถึง 1,000 องศาเซลเซียส เพื่อให้อิฐกลายเป็นเซรามิกที่มีความแข็งแรงและคงรูปไว้ กระบวนการนี้ต้องใช้เชื้อเพลิงเป็นจำนวนมาก เช่น ใช้น้ำมันหรือไม้ฟืนประมาณสองรถสิบล้อหรือประมาณ 30 ลูกบาศก์เมตรในการเผาอิฐหนึ่งครั้ง และใช้เวลาในการเผาประมาณ 7 ถึง 15 วัน ทำให้เกิดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติอย่างมาก มีแนวคิดการนำเถ้าจากอุตสาหกรรมเกษตรกลับมาใช้เป็นส่วนประกอบของวัสดุในการผลิตอิฐมอญและประยุกต์ใช้ปฏิกิริยาทางเคมีในการผลิตอิฐมอญ [11-12] เพื่อแก้ปัญหาต้นทุนการผลิตอิฐของชุมชนและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ทั้งในด้านกำจัดของเสียและการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากกระบวนการผลิตแบบดั้งเดิม

วัตถุประสงค์ของการศึกษานี้เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเถ้าลอยจากอุตสาหกรรมเกษตรมาผลิตอิฐดินเหนียวอบด้วยอุณหภูมิต่ำโดยใช้เทคโนโลยีการกระตุ้นด้วยต่าง ใช้วัสดุตั้งต้น 3 ชนิด คือ ดินเหนียว เถ้าปาล์ม และเถ้าไม้ยางพารา กระตุ้นกระบวนการทางเคมีด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ และทั้งสองชนิดผสมกัน เพื่อเป็นแนวทางในการผลิตอิฐดินเหนียวอบด้วยอุณหภูมิต่ำ

2. วัสดุประสานจากการกระตุ้นด้วยต่าง

อุตสาหกรรมวัสดุก่อสร้างในปัจจุบันจำเป็นต้องคำนึงถึงสิ่งแวดล้อมและเศรษฐกิจที่ยั่งยืน โดยต้องตอบโจทย์ทั้ง 4 ประการ คือ ลดการสูญเสียทรัพยากรธรรมชาติ ลดการใช้พลังงาน ลดต้นทุนการผลิต และลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก [13] วัสดุประสานจากการกระตุ้นด้วยต่าง (Alkali-

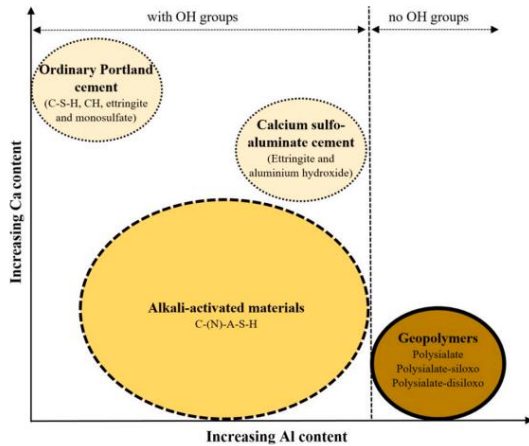
activated binders, AAB) ที่ผลิตจากของเสียจากอุตสาหกรรมทั้งหมดเป็นตัวเลือกที่ดีในการบรรลุเป้าหมายด้านความยั่งยืนในระดับโลก [14] และยังช่วยลดต้นทุนของวัสดุใหม่ด้วย [15-16] หลักการผลิตวัสดุชนิดนี้คือ วัสดุตั้งต้นจะถูกกระตุ้นด้วยสารละลายต่าง เช่น โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หรือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ซึ่งสารละลายสองชนิดหลังเป็นที่นิยม ทำให้วัสดุที่ได้มีคุณสมบัติเป็นวัสดุเชื่อมประสานซึ่งมีศักยภาพที่จะพัฒนาให้เป็นวัสดุทางเลือกลดการใช้หรือทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ordinary Portland cement, OPC) [17]

เทคโนโลยีการกระตุ้นด้วยต่าง (alkali-activation technology) เป็นกระบวนการเกิดปฏิกิริยารวมของการแยกตัวและการควบแน่น (Destruction-condensation) [18] ซึ่งประกอบด้วย การแยกตัวของวัสดุตั้งต้นเป็นหน่วยโครงสร้างที่มีเสถียรภาพต่ำ การปฏิสัมพันธ์กับโครงสร้างที่แข็งตัว (Coagulation structure) และการเกิดของโครงสร้างที่ควบแน่น ซึ่งเป็นกระบวนการละลาย (Dissolution) ของซิลิกา กระบวนการเคลื่อนย้าย (Transportation) และกระบวนการควบแน่น (Polycondensation) [19] กระบวนการเหล่านี้จะเกิดขึ้นพร้อม ๆ กัน จนไม่สามารถแยกการวิเคราะห์ในแต่ละกระบวนการได้ [20] ตามรายงานของ Palomo et al. [11] การกระตุ้นด้วยต่างสามารถแบ่งได้เป็น 2 กรณี คือ 1. ใช้วัสดุตั้งต้นที่มีซิลิกอนและแคลเซียมสูง ($\text{Si} + \text{Ca}$) กับสารละลายต่าง ได้ผลผลิตเป็น CSH หรืออาจจะเรียกอีกชื่อว่า วัสดุจากการกระตุ้นด้วยต่าง (alkali-activated materials, AAM) 2. ใช้วัสดุตั้งต้นที่มีซิลิกอนและอลูมิเนียมสูง ($\text{Si} + \text{Al}$) กับสารละลายต่างจะได้โพลิเมอร์เป็นผลผลิตและมีกำลังสูง Davidovits [21] เรียกวัสดุชนิดนี้ว่า จีโอโพลิเมอร์ (geopolymers)

ความแตกต่างระหว่างวัสดุจากการกระตุ้นด้วยต่างและจีโอโพลิเมอร์นั้นยังมีความคลุมเครือ Gökçe et al. [13] ได้อธิบายความแตกต่างระหว่างจีโอโพลิเมอร์ และวัสดุจากการกระตุ้นด้วยต่าง (AAM) ไว้ว่า โดยทั่วไปแล้วหากสารตั้งต้นที่มีอะลูมินา (Al_2O_3) และซิลิกา (SiO_2) เป็นส่วนประกอบหลักจะถือเป็นจีโอโพลิเมอร์ ในขณะที่วัสดุจากการกระตุ้นด้วยต่างจะมีซิลิกาและแคลเซียมออกไซด์ (CaO) โดยที่ไอออนของแคลเซียมจะเป็นนิวเคลียสผลึกอีกตัวนอกเหนือจากไอออนของซิลิกอนและอลูมิเนียมในกระบวนการจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน [22] เกิดได้สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ซึ่งมาจากการทำปฏิกิริยาของแคลเซียมซิลิเกตกับน้ำ แต่ในจีโอโพลิเมอร์จะไม่มีหมู่ OH ความแตกต่างระหว่างจีโอโพลิเมอร์และวัสดุจากการกระตุ้นด้วยต่างสามารถแสดงเป็นแผนภาพได้ตามรูปที่ 1

วัสดุประสานจากการกระตุ้นด้วยต่างมีโครงสร้าง 3 มิติแบบอสัณฐาน โดยสามารถใช้วัสดุตั้งต้นที่เป็นของเหลือจากโรงงานอุตสาหกรรมและการเกษตรซึ่งมีองค์ประกอบของอะลูมินาและซิลิกาเป็นหลัก สารตั้งต้นดังกล่าว ได้แก่ ดินเหนียวและเถ้าลอย Palomo et al. [20] กล่าวว่าเถ้าลอยเป็นวัสดุที่เผาแล้วอยู่ในสภาพอสัณฐานจะทำให้มีความสามารถในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับวัสดุที่ไม่ผ่านการเผา เถ้าลอยจากวัสดุการเกษตร เช่น เถ้าปาล์มและเถ้าไม้ยางพารา จะประกอบไปด้วยสารประกอบหลายชนิดแต่ที่พบในปริมาณสูงคือ SiO_2 และ CaO เมื่อนำไปผสมกับดินเหนียวที่มีองค์ประกอบของ Al_2O_3 และ SiO_2 จะเป็นสารตั้งต้นใน

การเกิดปฏิกิริยาได้ดี [23] ทำให้ได้วัสดุที่มีความสามารถรับแรงอัดได้ดี สามารถนำไปใช้เป็นวัสดุก่อสร้าง การซ่อมแซมถนน งานโครงสร้าง หรือเป็น อิฐทนความร้อน และวัสดุตกแต่งสวน เป็นต้น



รูปที่ 1 ความแตกต่างระหว่างซีโอโลไมเมอร์และวัสดุจากการกระตุ้นด้วยต่าง [13]

ถ้าลดจากการเกษตรในประเทศไทยส่วนมากจะมีปริมาณซิลิกาสูง และสำหรับเถ้าเถ้าฟอสฟอรัสจะมีส่วนประกอบของแคลเซียมที่สูงด้วยซึ่งสารตั้งต้นมีปริมาณแคลเซียมสูงจะส่งผลทำให้วัสดุประสานจากการกระตุ้นด้วยต่างที่ได้มีความแข็งแรงต่ำที่อุณหภูมิห้อง [24] แต่การใช้ความร้อนประมาณ 40 ถึง 90 องศาเซลเซียสจะสามารถเร่งการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีเพื่อเร่งการแข็งตัวได้ [25] และให้กำลังที่สูงเพียงพอ โดยปัจจัยที่ส่งผลต่อวัสดุประสานจากการกระตุ้นด้วยต่างมีหลายปัจจัย เช่น องค์ประกอบของวัสดุตั้งต้น อุณหภูมิที่ใช้ในการบ่มตัวอย่าง และมีปัจจัยที่สำคัญคือ สารละลายต่างที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา

3. การเตรียมวัสดุและการทดสอบ

3.1 วัสดุตั้งต้นในงานวิจัย

วัสดุตั้งต้นที่ใช้ในการผลิตตัวอย่างอิฐอบด้วยอุณหภูมิต่ำที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีสามชนิดได้แก่ ดินเหนียว เถ้าปาล์ม และเถ้าเถ้าฟอสฟอรัส

3.1.1 ดินเหนียว

ได้จากโรงงานผลิตอิฐ อำเภอท่าศาลา จังหวัดนครศรีธรรมราช ดินเหนียวมีลักษณะเนื้อละเอียดสีน้ำตาลเข้ม มีค่าความถ่วงจำเพาะ 2.61 ซีดจกักตเหลว (LL) เท่ากับร้อยละ 52.49 ซีดจกักตพลาสติก (PL) เท่ากับร้อยละ 20.81 ดัชนีพลาสติก (PI) เท่ากับร้อยละ 31.68 เมื่อผสมน้ำในดินเหนียวให้มีความชื้นใกล้เคียงกับขีดจกักตพลาสติกดินเหนียวจะเกาะเป็นก้อนแข็งเหนียวผิวมันลื่น เมื่อจำแนกตามระบบ Unified Soil Classification จัดอยู่ในกลุ่มดินเหนียวที่มีพลาสติกสูง (CH)

3.1.2 เถ้าปาล์ม

ได้จากโรงงานผลิตน้ำมันปาล์มจังหวัดสุราษฎร์ธานี เนื้อเถ้าละเอียดสีเทาเข้มปนดำ และบางส่วนมีลักษณะเป็นเม็ดคอนข้างหยาบ รูปร่างกลม

ขนาดไม่สม่ำเสมอ มีสีดำคล้ายถ่านหรือคาร์บอนปะปนอยู่เกิดจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ มีค่าความถ่วงจำเพาะ 2.04

3.1.3 เถ้าเถ้าฟอสฟอรัส

ได้จากโรงงานผลิตไฟฟ้าชีวมวลจังหวัดสงขลา ลักษณะของเถ้าเถ้าฟอสฟอรัสมีความชื้น จับตัวเป็นก้อนแข็งสีน้ำตาลอ่อน มีค่าความถ่วงจำเพาะ 2.59

จากนั้นศึกษาคุณสมบัติของวัสดุตั้งต้นทั้งสามชนิด ได้แก่ การหาองค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค XRF ศึกษาโครงสร้างผลึกของวัสดุด้วยเทคนิค XRD องค์ประกอบทางเคมีของดินเหนียว เถ้าปาล์ม และเถ้าเถ้าฟอสฟอรัสแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของดินเหนียว เถ้าปาล์ม และเถ้าเถ้าฟอสฟอรัส

สารประกอบ/ธาตุ	ความเข้มข้น (%)		
	ดินเหนียว	เถ้าปาล์ม	เถ้าเถ้าฟอสฟอรัส
Al ₂ O ₃	25.06	0.53	5.54
SiO ₂	58.61	53.66	25.79
CaO	0.32	14.95	27.68
K ₂ O	2.55	13.26	9.73
Fe ₂ O ₃	5.12	1.41	3.49
MgO	0.66	4.30	3.26
SO ₃	0.03	1.18	5.06
Na ₂ O	0.10	0.08	2.99
LOI	5.51	4.49	4.34

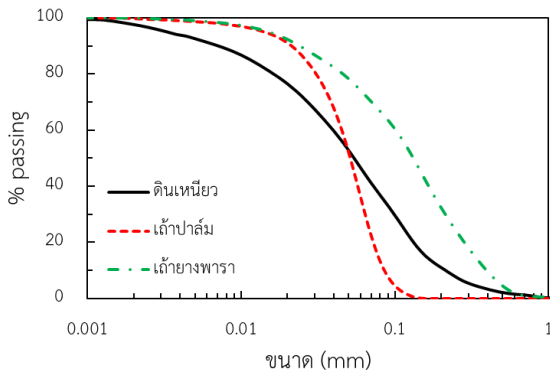
ดินเหนียว มีองค์ประกอบหลักคือ SiO₂ เท่ากับ 58.61 เปอร์เซ็นต์ รองลงมา คือ Al₂O₃ เท่ากับ 25.06 เปอร์เซ็นต์ เถ้าปาล์มมีองค์ประกอบหลักคือ SiO₂ เท่ากับ 53.66 เปอร์เซ็นต์ และ CaO เท่ากับ 14.95 เปอร์เซ็นต์ และเถ้าเถ้าฟอสฟอรัสมีองค์ประกอบหลัก คือ CaO เท่ากับ 27.68 เปอร์เซ็นต์ SiO₂ เท่ากับ 25.79 เปอร์เซ็นต์ และ Al₂O₃ เท่ากับ 5.54 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้น เถ้าปาล์มและเถ้าเถ้าฟอสฟอรัสมีองค์ประกอบที่สามารถนำมาเป็นส่วนผสมร่วมกับดินเหนียวในการเกิดปฏิกิริยาอัลคาไล แอคติเวตเตดได้ดี แล้วยังมี LOI ที่ใกล้เคียงกัน นั่นหมายความว่าระหว่างการทำการทดสอบที่มีน้ำหนักที่หายไปจากการเผาอยู่ที่ 4-5 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งส่วนที่หายไปคือแร่ธาตุหรือสารอินทรีย์นั่นเอง

3.2 การเตรียมตัวอย่างวัสดุตั้งต้น

3.2.1 การปรับปรุงขนาดของวัสดุ

นำดินเหนียวไปอบแห้งเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำดินที่อบแห้งแล้วไปบดและร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 40 สำหรับเถ้าเถ้าฟอสฟอรัส 2 ชนิดต้องนำไปบดและร่อนเพื่อไล่ธาตุโปรแตสเซียมออกเนื่องจากโปรแตสเซียมจะทำให้ผิวของก้อนตัวอย่างแตกดูไม่สวยงาม จากนั้นนำเถ้าเถ้าฟอสฟอรัสที่บดแล้วไปบดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำมาบดและร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 40 การกระจายตัวของอนุภาคของวัสดุตั้งต้นทั้งสามชนิดแสดงดังรูปที่ 2 พบว่าดินเหนียว เถ้าปาล์ม และเถ้าเถ้าฟอสฟอรัสมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 39.18 44.57 และ 78.63

ไมโครเมตร ตามลำดับ ซึ่งมีขนาดใกล้เคียงกันสามารถผสมกันและใช้เป็นวัสดุตั้งต้นได้ และขนาดอนุภาคเข้าที่มีขนาดเล็กจะช่วยเพิ่มความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาให้ดีขึ้น [26]



รูปที่ 2 การกระจายตัวของอนุภาควัสดุตั้งต้น

3.3 สารละลายต่าง

สารละลายต่างเป็นอีกปัจจัยเนื่องจากเป็นส่วนสำคัญในการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน (Polymerization) ช่วยชะล้าง Si และ Al ออกจากสารประกอบอะลูมินาและซิลิกา ก่อให้เกิดโครงสร้างแบบเจลของจีโอโพลิเมอร์ ซึ่งมีลักษณะเป็นวัสดุเชื่อมประสานคล้ายกับ C-S-H ของปูนซีเมนต์ แต่สารละลายต่างนั้นมีจำนวนมากหลายชนิด ที่นิยมใช้โดยทั่วไป คือ สารละลายต่างอัลคาไลน์เอิร์ธ ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งเป็นต่างจากธาตุหมู่ 1A มีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาสูง

3.3.1 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

NaOH เป็นสารเคมีของแข็งรูปเม็ด (bead) หรือแผ่นเกล็ด (flake) มีมวลโมเลกุล 40 กรัมต่อโมล ใช้กระบวนการอิเล็กโทรไลซิสของเกลือในการผลิต เมื่อนำมาละลายน้ำมีสมบัติเป็นด่างและมีฤทธิ์กัดกร่อน สามารถแตกตัวให้อิออนโซเดียม (Na⁺) และอิออนไฮดรอกไซด์ (OH⁻) ได้หมด โซเดียมไฮดรอกไซด์มีความถ่วงจำเพาะประมาณ 2.12 ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส และมีจุดหลอมเหลว 318 องศาเซลเซียส [27]

3.3.2 โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH)

KOH เรียกอีกอย่างว่าโซดาไฟ เป็นด่างที่มีฤทธิ์กัดกร่อนและดูดความชื้นสูงในรูปของผลึกสีขาวหรือเกล็ด มีจุดหลอมเหลว 360 องศาเซลเซียส และมีจุดเดือดที่ 1320 องศาเซลเซียส เนื่องจากมีคุณสมบัติกัดกร่อน ฟอกขาว และแห้ง โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์จึงถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมเคมี เช่น การผลิตผงซักฟอก สบู่ น้ำยาล้างผ้าขาว แบตเตอรี่อัลคาไลน์ เป็นต้น

เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตอิฐดินเหนียวอบด้วยอุณหภูมิต่ำจึงเลือกใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ชนิดเกล็ดตาม มอก 150-2518 ซึ่งเป็นสารละลายต่างที่นิยมใช้

ในการเกิดปฏิกิริยาเพื่อตรวจสอบอิทธิพลของสารละลายต่างต่อคุณสมบัติของอิฐดินเหนียวอบด้วยอุณหภูมิต่ำ

3.4 อัตราส่วนผสม

ในการออกแบบส่วนผสมอิฐดินเหนียวอบด้วยอุณหภูมิต่ำ ได้กำหนดสัดส่วนผสมดินเหนียว ใ้ถ้าปาล์ม และใ้ถ้ายางพาราโดยใช้ผลองค์ประกอบทางเคมีของสารตั้งต้นทั้ง 3 ชนิด และเลือกส่วนผสมให้มีปริมาณของซิลิกา อะลูมินา และแคลเซียมที่เหมาะสมสำหรับการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี โดยกำหนดเป็นสัดส่วนโดยน้ำหนัก ในงานวิจัยนี้จะกำหนดอัตราส่วนผสม 8 สูตรที่แตกต่างกัน อัตราส่วนผสมในการทดสอบและกำหนดสัญลักษณ์ได้ตามตารางที่ 2 อัตราส่วนผสมแต่ละสูตรจะนำมาผสมด้วยสารละลายต่างความเข้มข้น 15 โมลาร์ และกำหนดอัตราส่วนของแข็งต่อของเหลวอยู่ที่ 0.22

ตารางที่ 2 อัตราส่วนผสมของสารตั้งต้น

สูตรที่	สัญลักษณ์	อัตราส่วน (%)		
		ดินเหนียว	ใ้ถ้าปาล์ม	ใ้ถ้ายางพารา
1	S100-P00-R00	100	-	-
2	S90-P10-R00	90	10	-
3	S80-P20-R00	80	20	-
4	S70-P30-R00	70	30	-
5	S60-P40-R00	60	40	-
6	S50-P10-R40	50	10	40
7	S60-P05-R35	60	5	35
8	S70-P00-R30	70	-	30

แต่ละอัตราส่วนผสมจะใช้สารละลายต่างสามรูปแบบในการทำปฏิกิริยา คือสารละลาย NaOH สารละลาย KOH ความเข้มข้น 15 โมลาร์ และสารละลาย MIX คือสารละลายที่ผสมกันระหว่าง NaOH และ KOH ความเข้มข้น 15 โมลาร์ในอัตราส่วนผสม 50:50 ทุกอัตราส่วนการผสมและการผสมสารละลายต่างแต่ละรูปแบบจะใช้เวลาในการบ่ม 7 14 และ 28 วัน หนึ่งในชุดการทดสอบจะใช้ตัวอย่าง 3 ตัวอย่าง

3.5 การเตรียมตัวอย่าง

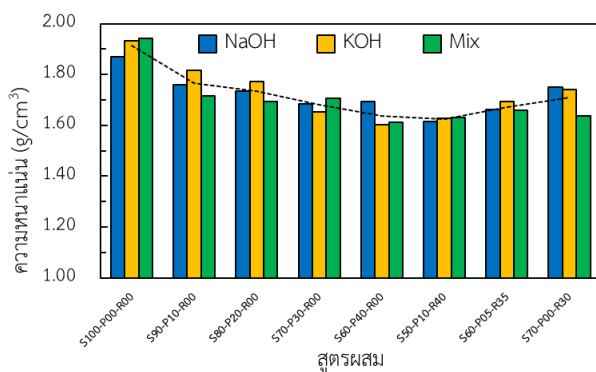
อัตราส่วนผสมที่ออกแบบไว้เป็นอัตราส่วนผสมโดยน้ำหนัก ดังนั้นเพื่อลดความคลาดเคลื่อนของส่วนผสมจากที่ออกแบบไว้จึงนำวัสดุตั้งต้นทั้ง 3 ชนิดอบที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง บดและร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 40 เพื่อแยกสิ่งเจือปนและแยกใ้ถ้าขนาดใหญ่ออก ซึ่งน้ำหนักตามอัตราส่วนในแต่ละสูตรแล้วผสมให้เข้ากันก่อนนำสารละลายต่างเทลงไปทำการคลุกเคล้าให้เข้ากันและนำส่วนผสมที่ได้ปั่นด้วยเครื่องปั่นอีกครั้ง เพื่อให้ส่วนผสมเข้ากันได้ดี ขึ้นรูปตัวอย่างในโมลขนาด 5x5x5 เซนติเมตร แบ่งกระท่งเป็นสามชั้นชั้นละ 25 ครั้ง เมื่อได้ส่วนผสมเต็มโมลแล้วปาดแต่งร่อนกว่าตัวอย่างแข็งตัวจึงแกะออก บ่มในอากาศเป็นเวลา 1 วัน แล้วนำเข้าสู่อบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 วันเพื่อเร่งปฏิกิริยา บ่มทิ้งไว้ในอากาศโดยใช้ระยะเวลาในการบ่ม 7 14 และ 28 วัน แล้วจึงนำไป

ทดสอบกำลังรับแรงอัด หลังจากนั้นนำตัวอย่างที่เหลือจากการทดสอบรับกำลังรับแรงอัดมาทดสอบการละลายน้ำ

4. การวิเคราะห์ผลการทดสอบ

4.1 ความหนาแน่นและการหดตัว

ตัวอย่างอิฐดินเหนียวที่ผ่านการอบแล้วจะถูกวิเคราะห์ขนาดโดยใช้เวอร์เนียร์คาลิเปอร์เป็นอุปกรณ์ในการวัดขนาดของอิฐอบด้วยอุณหภูมิต่ำทุกตัวอย่าง ความกว้าง ความยาว ความสูง ไม่มีการเปลี่ยนแปลง ทั้งก่อนอบ หลังอบ และหลังจากการบ่มที่ 7 14 และ 28 วันด้วย จึงสามารถสรุปได้ว่า อิฐดินเหนียวอบด้วยอุณหภูมิต่ำไม่มีการหดตัว เนื่องจากตัวอย่างอิฐดินเหนียวอบด้วยอุณหภูมิต่ำไม่มีการหดตัว การทดสอบความหนาแน่นจะแสดงผลโดยใช้ความหนาแน่นเฉลี่ยของแต่ละอัตราส่วนผสมกับการใช้สารละลายต่างทั้งสามรูปแบบ



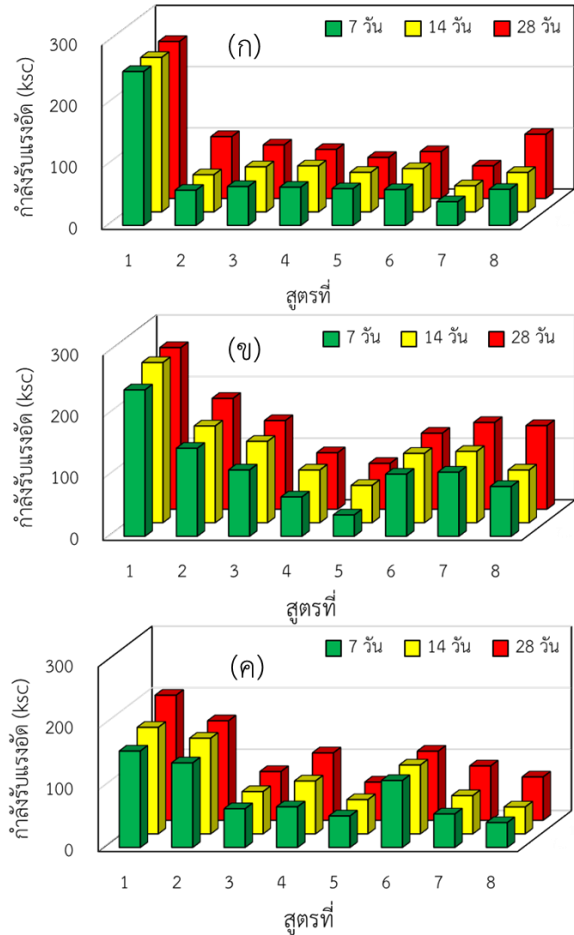
รูปที่ 3 ความหนาแน่นเฉลี่ยของอิฐเทียบกับปริมาณเถ้าที่ผสมในอิฐ

จากรูปที่ 3 แสดงให้เห็นว่าค่าความหนาแน่นของอิฐอบด้วยอุณหภูมิต่ำขึ้นอยู่กับวัสดุตั้งต้น โดยส่วนผสมที่เป็นดินเหนียวทั้งหมดจะมีความหนาแน่นสูงที่สุด มีค่าความหนาแน่นเฉลี่ยอยู่ที่ 1.92 g/cm³ และเมื่อมีการเพิ่มปริมาณเถ้ามากขึ้นจะมีแนวโน้มให้ความหนาแน่นของอิฐลดลง อัตราส่วนผสมสูตรที่ให้ความหนาแน่นน้อยที่สุดคือ S50-P10-R40 มีความหนาแน่นเฉลี่ยอยู่ที่ 1.62 g/cm³ สำหรับการวิจัยนี้มุ่งเน้นการใช้เถ้าเป็นส่วนผสมดังนั้นสูตรผสมเถ้าที่ให้ความหนาแน่นมากที่สุดคือ S90-P10-R00 มีความหนาแน่นเฉลี่ยอยู่ที่ 1.76 g/cm³

4.2 กำลังรับแรงอัด

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแสดงดังรูปที่ 4 โดยอิฐดินเหนียวอบด้วยอุณหภูมิต่ำสูตรที่ 1 (S100-P00-R00) จากสารละลายต่างกระตุ้นปฏิกิริยาทั้ง 3 แบบให้ค่ากำลังอัดสูงสุด โดยเมื่อใช้สารละลาย NaOH จะให้ค่ากำลังอัดสูงสุด 256.32 ksc ที่การบ่ม 28 วัน เมื่อใช้สารละลาย KOH จะให้ค่ากำลังอัดสูงสุด 262.38 ksc ที่การบ่ม 28 วัน และเมื่อใช้สารละลาย MIX จะให้ค่ากำลังอัดสูงสุด 203.25 ksc ที่การบ่ม 28 วัน เนื่องจากมีดินเหนียวเป็นวัสดุตั้งต้นเพียงชนิดเดียวและดินเหนียวมี Al₂O₃ และ SiO₂ เป็นองค์ประกอบหลักซึ่งมีความเหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยา เมื่อนำมา

เปรียบเทียบกับอิฐที่ผลิตจากวิธีดั้งเดิม โดยการนำดินเหนียวล้วนขึ้นรูปด้วยแบบขนาดเดียวกันและเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสจนอิฐสุก นำมาทดสอบกำลังรับแรงอัดได้เท่ากับ 190.04 ksc ซึ่งน้อยกว่าอิฐดินเหนียวอบด้วยอุณหภูมิต่ำสูตรที่ 1 ที่ได้รับจากสารละลายต่างกระตุ้นปฏิกิริยาทั้ง 3 แบบ



รูปที่ 4 กำลังรับแรงอัดของอิฐแต่ละสูตรผสมที่เวลาต่างกัน (ก) ผสมด้วย NaOH, (ข) ผสมด้วย KOH, (ค) ผสมด้วย MIX

4.2.1 อิทธิพลของระยะเวลาในการบ่มที่มีผลต่อค่ากำลังอัดสูงสุด

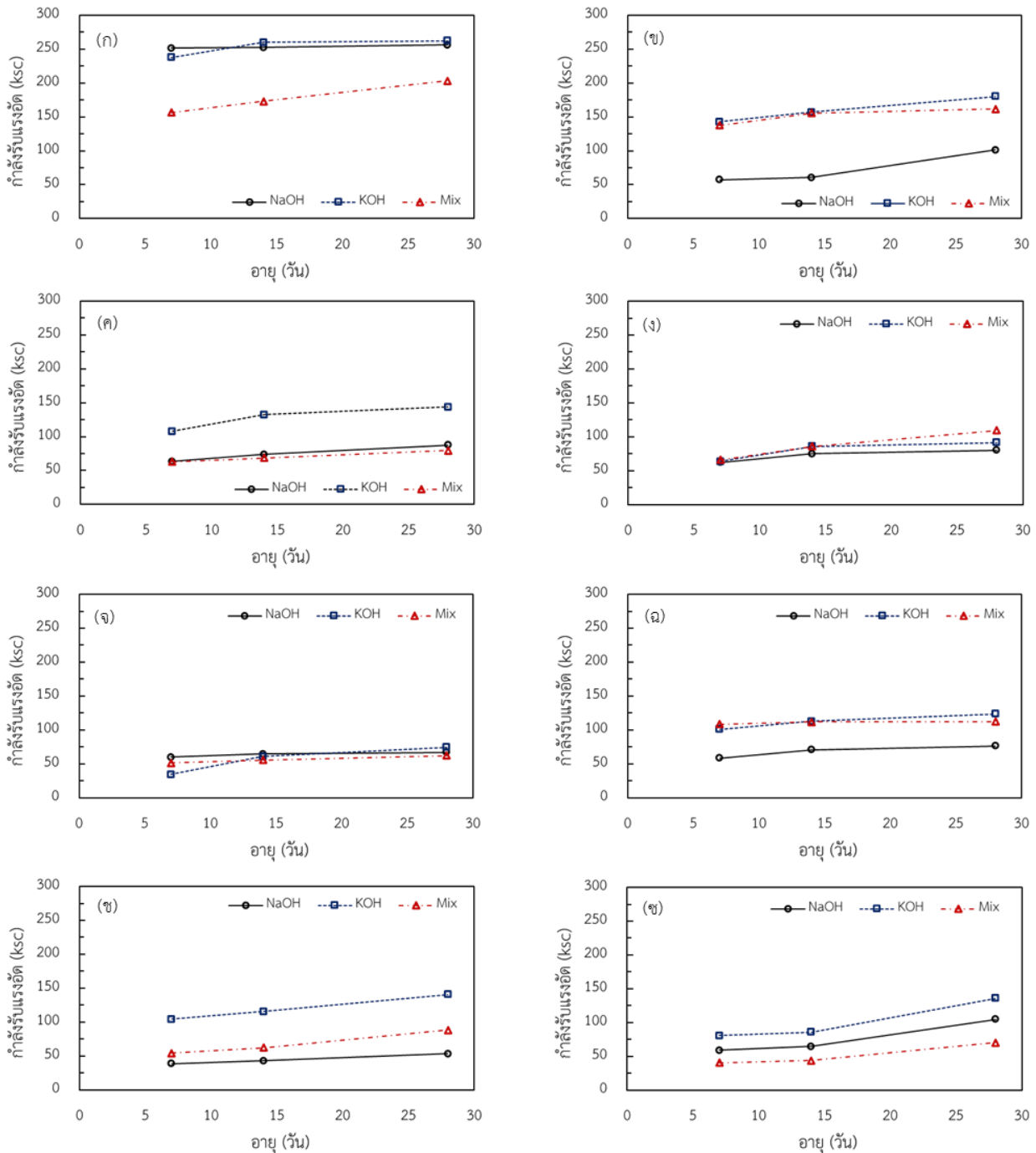
ระยะเวลาในการบ่มที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้กำลังอัดเพิ่มขึ้นทุกตัวอย่างการทดสอบแสดงดังรูปที่ 5 พบว่าการพัฒนา กำลังอัดจะเพิ่มมากขึ้นอย่างชัดเจนที่ระยะเวลาในการบ่ม 7 วัน และการพัฒนา กำลังอัดมีแนวโน้มจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในช่วงการบ่ม 7 ถึง 14 วัน หลังจากนั้นการพัฒนา กำลังอัดมีน้อยมาก ซึ่งการพัฒนา กำลังที่เพิ่มสูงขึ้นที่ระยะเวลาในการบ่ม 28 วัน ในทุกอัตราส่วนการผสม

4.2.2 อิทธิพลของเถ้าที่มีผลต่อค่ากำลังอัดสูงสุด

การทดสอบกำลังรับแรงอัดของอิฐดินเหนียวอบด้วยอุณหภูมิต่ำที่ผสมด้วยเถ้าปาล์มและเถ้าไม้ยางพารา พบว่า กำลังรับแรงอัดจะลดลงตาม

ปริมาณเถ้าที่เพิ่มขึ้นในทุก ๆ รูปแบบของการใช้สารละลายต่าง ดังรูปที่ 4 สังเกตได้ว่าอัตราส่วนผสมสูตรที่ 1 ซึ่งไม่มีเถ้าผสมอยู่จะให้กำลังรับแรงอัดสูงที่สุดอย่างเห็นได้ชัด และอัตราส่วนผสมสูตรที่ 5 (มีเถ้าผสมอยู่ 40%) จะให้กำลังรับแรงอัดที่น้อยที่สุดและสังเกตเห็นได้ในเกือบจะทุกรูปแบบของการใช้สารละลายต่าง แต่เป็นที่น่าสังเกตคืออัตราส่วนผสมสูตรที่ 6 จะมีเถ้าผสมอยู่ 50% และเป็นอัตราส่วนผสมที่มีปริมาณเถ้ามากที่สุดแต่กลับมีกำลังรับ

แรงอัดสูงกว่าอัตราส่วนผสมสูตรที่ 5 ซึ่งมีเถ้าผสมอยู่เพียง 40% ทั้งนี้ น่าจะเป็นเพราะส่วนผสมสูตรที่ 6 มีการผสมเถ้าไม้ยางพาราถึง 40% แต่ไม่มีส่วนผสมของเถ้ายางพาราในอัตราส่วนผสมสูตรที่ 5 ในเถ้าไม้ยางพารามีส่วนประกอบของ CaO ประมาณ 27.68% ทำวัสดุตั้งต้นสำหรับทำอิฐในอัตราส่วนผสมสูตรที่ 6 มีปริมาณ CaO สูง จึงอาจส่งผลต่อกำลังรับแรงอัดที่เพิ่มขึ้น



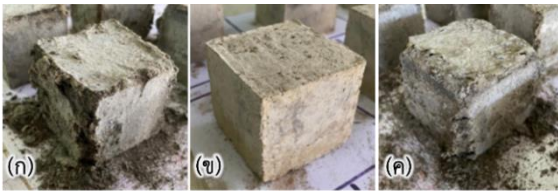
รูปที่ 5 กำลังรับแรงอัดของอิฐดินเหนียวอบด้วยอุณหภูมิต่ำที่อายุการบ่ม 7 14 และ 28 วัน ของดินสูตรผสมต่างกัน

(ก) สูตรที่ 1 (ข) สูตรที่ 2 (ค) สูตรที่ 3 (ง) สูตรที่ 4 (จ) สูตรที่ 5 (ฉ) สูตรที่ 6 (ช) สูตรที่ 7 (ซ) สูตรที่ 8

4.2.3 อิทธิพลของสารละลายต่างที่มีผลต่อค่ากำลังอัดสูงสุด

ผลการทดสอบทั้งหมดที่กล่าวมาข้างต้น จะเห็นได้ว่าตัวอย่างที่กระตุ้นปฏิกิริยาเคมีด้วย KOH จะมีค่ากำลังรับแรงอัดที่สูงกว่าตัวอย่างที่กระตุ้นปฏิกิริยาเคมีด้วยสารละลายชนิดอื่น จะเห็นได้ชัดเจนในส่วนผสมสูตรที่ 2 ซึ่งมีเถ้าปาล์มน้ำมันผสมอยู่ 10% และส่วนผสมสูตรที่ 6 ซึ่งมีเถ้าปาล์มน้ำมันผสมอยู่ 10% และมีเถ้าไม้ยางพาราผสมอยู่ถึง 40% นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้สารละลาย MIX (ผสมกันระหว่าง NaOH และ KOH) เป็นสารกระตุ้นจะได้วัสดุที่มีความแข็งแรงน้อยกว่าวัสดุที่ใช้สารละลาย NaOH หรือ KOH เพียงอย่างเดียว ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Bakharev [28]

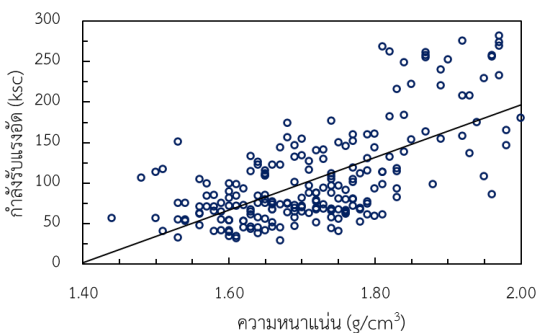
เมื่อพิจารณาลักษณะของตัวอย่างจากการกระตุ้นปฏิกิริยาเคมีด้วยสารละลายทั้ง 3 แบบดังรูปที่ 6 พบว่าตัวอย่างที่ผสมด้วยสารละลาย NaOH จะมีผิวไม่เรียบและเนื้อบางส่วนแตกเมื่อเวลาผ่านไป ซึ่งอาจจะเป็นผลทำให้กำลังรับแรงอัดของตัวอย่างที่กระตุ้นปฏิกิริยาเคมีด้วย KOH มีค่าสูงกว่าตัวอย่างที่ผสมด้วยสารละลาย NaOH และสารละลาย MIX



รูปที่ 6 ตัวอย่างผสมด้วยสารเคมี 3 แบบ
(ก) ผสมด้วย NaOH, (ข) ผสมด้วย KOH, (ค) ผสมด้วย MIX

4.2.4 อิทธิพลของความหนาแน่นที่มีผลต่อค่ากำลังอัดสูงสุด

จากการทดสอบทั้งหมดทำให้ได้ข้อมูลสำหรับการเปรียบเทียบโดยจะใช้ผลการทดสอบจากตัวอย่างที่มี ซึ่งมีอัตราส่วนผสมทุกสูตร กระตุ้นปฏิกิริยาเคมีด้วยสารละลายทุกชนิด และการบ่มที่เวลาต่าง ๆ กันตั้งแต่ 7 14 และ 28 วัน แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นและกำลังรับแรงอัดของแต่ละตัวอย่างได้ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและกำลังรับแรงอัด

เนื่องจากการทดลองอาจทำให้ค่าการกระจายของข้อมูลบางส่วน แต่เมื่อพิจารณาเส้นแนวโน้มทำให้สามารถอธิบายได้ว่าตัวอย่างการทดสอบให้ค่าความหนาแน่นสูงยอมให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่สูงขึ้นตามไปด้วย

4.3 ผลการทดสอบการละลายน้ำ

การผลิตอิฐมอญแบบดั้งเดิมจะต้องใช้ความร้อนสูงเพื่อให้ดินเหนียวกลายเป็นเซรามิกและจะไม่สามารถละลายน้ำได้ เพื่อตรวจสอบคุณสมบัติด้านการละลายน้ำของอิฐดินเหนียวอบด้วยอุณหภูมิต่ำ จึงได้นำตัวอย่างจากอิฐดินเหนียวอบด้วยอุณหภูมิต่ำเป็นเวลา 7 วัน ดังรูปที่ 8 เทียบกับตัวอย่างดินเหนียวปลาวาที่ขึ้นรูปกับน้ำสะอาดนำมาละลายน้ำ ผลสอบปรากฏว่าเมื่อเทน้ำออกจากวัสดุเชื่อมประสานดังกล่าวยังคงรูปเดิม แสดงว่าก่อนตัวอย่างที่นำมาทดสอบนั้นไม่มีสารละลายน้ำ หมายความว่าทั้งผลของสารละลายต่างทำปฏิกิริยากับดินเหนียวและถ้าตามอัตราส่วนผสมต่าง ๆ ทั้ง 8 สูตรทำให้ตัวอย่างเปลี่ยนโครงสร้างภายในเป็นผลึกอสัณฐานเหมือนกับอิฐมอญที่มาจากวิธีการเผาแบบทั่วไป จึงทำให้วัสดุไม่มีการละลายน้ำ ส่วนดินเหนียวขึ้นรูปด้วยน้ำพบว่าเกิดการละลายน้ำ ซึ่งจะเหมาะสำหรับนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุตกแต่งทางสถาปัตยกรรม เช่น กระเบื้องผนังหลังคา กระเบื้องปูพื้น เนื่องจากลักษณะผิวสัมผัสที่เรียบเนียนและมีสีผิวที่ถือว่าสวยงามในทางสถาปัตยกรรม



รูปที่ 8 การทดสอบการละลายน้ำ

5. บทสรุป

จากการศึกษาการผลิตอิฐดินเหนียวอบด้วยอุณหภูมิต่ำด้วยเทคโนโลยีการกระตุ้นด้วยต่าง โดยใช้วัสดุตั้งต้น 3 ชนิด คือ ดินเหนียว เถ้าปาล์ม และเถ้าไม้ยางพาราซึ่งเป็นเศษเหลือจากอุตสาหกรรม การเกษตรและดินเหนียวซึ่งเป็นวัสดุธรรมชาติ กระตุ้นปฏิกิริยาทางเคมีด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ และทั้งสองชนิดผสมกันจากนั้นใช้ความร้อน 80 องศาเซลเซียสในการเร่งปฏิกิริยาและบ่มที่ 7 14 และ 28 วัน สามารถสรุปได้ดังนี้

1. ดินเหนียว มีส่วนผสมหลักคือ Al_2O_3 และ SiO_2 เถ้าปาล์มและเถ้าไม้ยางพารา มีส่วนผสมหลักคือ CaO และ SiO_2 สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุตั้งต้นในการผลิตอิฐดินเหนียวอบด้วยอุณหภูมิต่ำได้

2. การศึกษาคุณสมบัติของอิฐด้วยวิธีการทางเคมี พบว่ากำลังรับแรงอัดของอิฐมีค่าสูงขึ้นตามปริมาณดินเหนียวที่เพิ่มขึ้น โดยอิฐดินเหนียวไม่ผสมเถ้ามีการพัฒนากำลังรับแรงอัดมากที่สุด

3. ในระยะเวลาการบ่ม 28 วัน พบว่าอิฐดินเหนียวอบด้วยอุณหภูมิต่ำ มีการพัฒนากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการบ่ม กระบวนการทางเคมีมีการพัฒนากำลังรับแรงอัดที่ค่อนข้างคงที่ในช่วงระยะเวลา 28 วัน

4. สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เมื่อใช้ในการกระตุ้นปฏิกิริยาในการผลิตอิฐอบด้วยอุณหภูมิต่ำผสมด้วยเถ้าแล้วจะให้กำลังอัดสูงกว่าการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ นอกจากนี้การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ผสมกันมีแนวโน้มที่จะให้กำลังอัดต่ำที่สุด

5. เมื่อนำมาเทียบกับการผลิตอิฐแบบดั้งเดิมด้วยวิธีการเผาที่อุณหภูมิสูง พบว่าอิฐด้วยวิธีการทางเคมีไม่มีการละลายน้ำ นอกจากนี้พบว่ามีคุณสมบัติที่เหนียวด้วยอุณหภูมิต่ำมีโครงสร้างเป็นผลึกอสัณฐาน และมีคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับใช้แทนอิฐมอดูดั้งเดิม

6. อิฐดินเหนียวอบด้วยอุณหภูมิต่ำที่มีค่าความหนาแน่นสูงกว่าจะให้กำลังรับแรงอัดที่สูงด้วยเช่นกัน

เอกสารอ้างอิง

- [1] สุทธิชัย ต้นเจริญ และ อภิเสกฐ์ สุวรรณสะอาด (2565). การศึกษาสัดส่วนของเถ้าขานอ้อยที่มีผลต่อกำลังรับแรงอัดในคอนกรีต. *วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม*, ฉบับที่ 18(11), หน้า 51-62.
- [2] พิพรรณ อินปลัด และ สหลาก หอมวุฒิวงศ์ (2020). ปัจจัยที่มีผลต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าขานอ้อยผสมเศษอะลูมิเนียม. *Naresuan University Engineering Journal*, ฉบับที่ 15(12), หน้า 65-74.
- [3] สาโรจน์ ดำรงค์ (2015). ผลกระทบของการใช้เถ้ากลบผสมเถ้าลอยต่อคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีต. *RMUTP Research Journal*, ฉบับที่ 9(11), หน้า 125-133.
- [4] ขวัญชีวา หงสตา และ ชูเกียรติ ชูเกียรติ (2561). การใช้เถ้าปาล์มน้ำมันในคอนกรีตกำลังสูง. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี*, ปีที่ 20, ฉบับที่ 1, หน้า 74-82.
- [5] ทวิช กล้าแท้, นกตล ศรีภักดี, ชยณัฐ บัวทองเกื้อ และ นฤพล ดีดาช (2563). การใช้ประโยชน์จากเถ้าไม้ยางพาราในผลิตภัณฑ์คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น. *วารสารวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย*, ฉบับที่ 12(11), หน้า 36-48.
- [6] จริญญา เจริญเนตร (2003). การศึกษาศักยภาพของเถ้าซีลี้อยไม่ยางพารามาใช้ในงานคอนกรีต. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย, สงขลา.
- [7] สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร (2565). สถิติการเกษตรของประเทศไทย ปี ๒๕๖๔, กรุงเทพฯ.
- [8] อาปิติน ตะแซสามะ, จินดา มะมิง, โนรีสะ ราแดง และ ยาเซ็ง อาแว (2554). สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลของอิฐที่มีส่วนผสมของเถ้าไม้ยางพารา. *วารสารมหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา*, ฉบับที่ 6(11), หน้า 25-35.
- [9] มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (2561). อิฐก่อสร้างสามัญ มอก. 77-2545. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, กรุงเทพฯ.
- [10] มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (2562). อิฐกลวงก่อผนังรับน้ำ หน้า ก มอก. 153-2540. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, กรุงเทพฯ.
- [11] Diop, M.B. and Grutzeck, M.W. (2008). Low temperature process to create brick. *Construction and Building Materials*, 22(6), pp. 1114-1121.
- [12] Diop, M. B., Molez, L. B., Bouguerra, A., Diouf, A. N. and Grutzeck, M. W. (2014). Manufacturing brick from attapulgitic clay at low temperature by geopolymerization. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 39(6), pp. 4351-4361.
- [13] Gökçe, H.S., Tuyan, M. and Nehdi, M.L. (2021). Alkali-activated and geopolymer materials developed using innovative manufacturing techniques: A critical review. *Construction and Building Materials*, 303.
- [14] Van Deventer, J.S., Provis, J.L., Duxson, P. and Brice, D.G. (2010). Chemical research and climate change as drivers in the commercial adoption of alkali activated materials. *Waste Biomass Valor*, 1(1), pp. 145-155.
- [15] Diwan, B., Parkhey, P. and Gupta, P. (2018). From agro-industrial wastes to single cell oils: a step towards prospective biorefinery. *Folia microbiologica*, 63(5), pp. 547-568.
- [16] Jones, M., Bhat, T., Huynh, T., Kandare, E., Yuen, R., Wang, C.H. and John, S. (2018). Waste-derived low-cost mycelium composite construction materials with improved fire safety. *Fire and Materials*, 7(42), pp. 816-825.

- [17] นิดา ชัยมูล และ กริสน์ ชัยมูล (2557). วัสดุประสานจากการกระตุ้นด้วยด่าง/จีโอโพลิเมอร์ และการประยุกต์ใช้กับวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม. *KKU Engineering Journal*, ฉบับที่ 41(12), หน้า 263-270.
- [18] Glukhovskiy, V., Rostovskaja, G. and Rumyna, G. (1980). High strength slag-alkaline cements. *Proceedings of the seventh international congress on the chemistry of cement*, pp. 164-168.
- [19] Van Jaarsveld, J., Van Deventer, J. and Lorenzen, L. (1998). Factors affecting the immobilization of metals in geopolymerized flyash. *Metallurgical and materials transactions B*, 29(1), pp. 283-291.
- [20] Palomo, A., Grutzeck, M. and Blanco, M. (1999). Alkali-activated fly ashes: A cement for the future. *Cement and concrete research*, 29(8), pp. 1323-1329.
- [21] Davidovits, J. and Cordi, S. (1979). Synthesis of new high temperature geo- polymers for reinforced plastics/composites. *Spe Pactec*, 79, pp. 151-154.
- [22] Van Deventer, J., Provis, J., Duxson, P. and Lukey, G. (2007). Reaction mechanisms in the geopolymeric conversion of inorganic waste to useful products. *Journal of hazardous materials*, 139(13), pp. 506-513.
- [23] ปริญญา จินดาประเสริฐ (2547). *แก้วลอยในงานคอนกรีต*. สมาคมคอนกรีตไทย, กรุงเทพฯ.
- [24] Pangdaeng, S., hoo- ngerkham, T., Sata, V. and Chindaprasirt, P. (2014). Influence of curing conditions on properties of high calcium fly ash geopolymer containing Portland cement as additive. *Materials & Design*, 53, pp. 269-274.
- [25] Chindaprasirt, P., Chareerat, T. and Sirivivatnanon, V. (2007). Workability and strength of coarse high calcium fly ash geopolymer. *Cement and concrete composites*, 29(3), pp. 224-229.
- [26] อภา สอนเสาวภาคย์ (2553). การศึกษาเปรียบเทียบการกัดกร่อนของซัลเฟตและกรดของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลานปริมาณมากและมอร์ตาร์จีโอโพลิเมอร์เข้าหน้ามหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- [27] อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์ (2560). *วัสดุจีโอโพลิเมอร์*. สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย, กรุงเทพฯ.
- [28] Bakharev, T. (2005). Durability of geopolymer materials in sodium and magnesium sulfate solutions. *Cement and concrete research*, 35(6), pp. 1233-1246.