



การพัฒนาสมบัติการทนความร้อนของอิฐจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยและดินขาวเผาโดยการเติมเถ้าชานอ้อย

พิสิทธิ์ ทิพย์เสม¹ และ ไพจิตร ผาวัน^{1*}

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยศรีปทุม

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: pajit.pa@spu.ac.th

วันที่รับบทความ: 25 มีนาคม 2568; วันที่ทบทวนบทความ: 4 มิถุนายน 2568; วันที่ตอบรับบทความ: 13 มิถุนายน 2568

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 19 สิงหาคม 2568

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาการพัฒนาอิฐจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยผสมดินขาวเผาและเถ้าชานอ้อยเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการป้องกันความร้อน โดยศึกษาผลของการแทนที่เถ้าลอยด้วยเถ้าชานอ้อยในอัตราส่วนร้อยละ 0 10 20 และ 30 โดยน้ำหนัก ต่อคุณสมบัติทางกายภาพและเชิงกล ได้แก่ กำลังรับแรงอัด ความหนาแน่น ความพรุน การดูดซึมน้ำ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน และความสามารถในการต้านทานความร้อนสูง ผลการวิจัยพบว่าการเพิ่มปริมาณเถ้าชานอ้อยส่งผลให้ค่าการนำความร้อนลดลงอย่างมีนัยสำคัญ โดยสูตร BA30 มีค่าการนำความร้อนลดลงมากที่สุดถึง 41.1% (0.277 W/m·K) ขณะที่กำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าชานอ้อย โดยที่อายุ 28 วัน สูตร BA0 BA10 BA20 และ BA30 มีค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ย 14.23 13.29 8.53 และ 9.18 MPa ตามลำดับ ทั้งนี้ เมื่อพิจารณาคุณสมบัติโดยรวมพบว่าสูตร BA10 มีความเหมาะสมที่สุดโดยมีกำลังอัดสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐาน มอก.77-2565 ถึง 32.9% ค่าการนำความร้อนลดลง 12.8% มีความทนทานต่อความร้อนสูงสุด โดยรักษากำลังไว้ได้ 18.7% ที่อุณหภูมิ 1000°C การวิเคราะห์ต้นทุนพบว่าอิฐจีโอโพลิเมอร์มีต้นทุนประมาณ 4 บาทต่อก้อน ทั้งยังมีการนำความร้อนต่ำกว่าอิฐฐมอญและอิฐบล็อกทั่วไปกว่า 40% และสามารถทนไฟได้นานกว่า 4 ชั่วโมง แสดงถึงคุณสมบัติในการป้องกันความร้อนที่เหนือกว่าอย่างชัดเจน

คำสำคัญ: อิฐจีโอโพลิเมอร์; เถ้าลอยผสมดินขาวเผา; เถ้าชานอ้อย; วัสดุก่อสร้างยั่งยืน

Development of Heat Resistance Properties of Geopolymer Bricks from Fly Ash and Metakaolin by Bagasse Ash Addition

Pisit Tippayasem¹ and Pajjit Pawan^{1*}

¹ Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Sripatum University

* Corresponding author, E-mail: pajjit.pa@spu.ac.th

Received: 25 March 2025; Revised: 4 June 2025; Accepted: 13 June 2025

Online Published: 19 August 2025

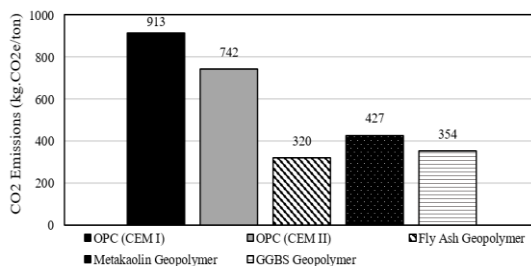
Abstract: This research aimed to develop geopolymer bricks using fly ash blended with metakaolin and bagasse ash to enhance thermal insulation properties. The study examined the effects of replacing fly ash with bagasse ash at proportions of 0%, 10%, 20%, and 30% by weight on the physical and mechanical properties, including compressive strength, density, porosity, water absorption, thermal conductivity coefficient, and high-temperature resistance. The results showed that increasing the bagasse ash content significantly reduced thermal conductivity, with the BA30 formulation achieving the greatest reduction of 41.1% (0.277 W/m·K). Meanwhile, compressive strength tended to decrease with increasing bagasse ash content. At 28 days, formulations BA0, BA10, BA20, and BA30 exhibited average compressive strengths of 14.23, 13.29, 8.53, and 9.18 MPa, respectively. Overall, the BA10 formulation was found to be optimal, with compressive strength exceeding the TIS 77-2565 standard by 32.9%, thermal conductivity reduced by 12.8%, and maximum heat resistance, retaining 18.7% of its strength at 1000°C. Cost analysis revealed that geopolymer bricks cost approximately 4 baht per unit. It also exhibited thermal conductivity values over 40% lower than those of conventional clay and concrete bricks, and withstood fire exposure for more than 4 hours, clearly demonstrating superior thermal insulation performance.

Keywords: Geopolymer Bricks; Fly ash mixed with metakaolin; Bagasse ash; Sustainable construction materials

1. บทนำ

อุตสาหกรรมการก่อสร้างนับเป็นหนึ่งในภาคส่วนที่บริโภคพลังงานและปล่อยก๊าซเรือนกระจกในปริมาณมหาศาล โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ซึ่งเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตคอนกรีต ก่อให้เกิดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ประมาณ 1 ton.CO₂e ต่อการผลิตปูนซีเมนต์ 1 ตัน [1] ด้วยเหตุนี้ จึงมีการพัฒนาวัสดุทางเลือกชนิดใหม่ที่ปล่อย CO₂ ต่ำ หนึ่งในนั้นคือ “จีโอโพลิเมอร์” ซึ่งเป็นวัสดุเชื่อมประสานชนิดใหม่ที่ไม่ใช้ปูนซีเมนต์สังเคราะห์ได้จากวัสดุที่มีซิลิกาและอะลูมินาเป็นองค์ประกอบหลัก เช่น เถ้าลอย (Fly Ash) เถ้าชานอ้อย (Bagasse Ash) หรือดินขาวเผา (Metakaolin) โดยทำปฏิกิริยากับสารละลายต่าง ซึ่งประกอบไปด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium Hydroxide: NaOH) และโซเดียมซิลิเกต (Sodium Silicate: Na₂SiO₃) [2] และสามารถลดการปล่อย CO₂ ได้ถึง 80% เมื่อเทียบกับคอนกรีตทั่วไป [3-5] ด้วยเหตุนี้ การพัฒนา “อิฐจีโอโพลิเมอร์” จึงได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นในฐานะวัสดุก่อสร้างที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

แม้ว่าอิฐจีโอโพลิเมอร์จะมีข้อดีหลายประการ แต่ยังมีข้อจำกัดที่ต้องพัฒนาปรับปรุง เช่น จากการศึกษาของ Ibrahim et al. [6] พบว่าอิฐจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยยังมีความหนาแน่นสูง และอิฐจีโอโพลิเมอร์จากเศษอิฐดินเผาของ El Naggar et al. [7] ที่มีค่าการนำความร้อนที่สูงกว่าอิฐมวลเบา การใช้เถ้าชานอ้อยเป็นส่วนผสมเพิ่มในจีโอโพลิเมอร์จึงมีความน่าสนใจ เนื่องจากมีซิลิกาเป็นองค์ประกอบหลักในปริมาณสูง (60-75%) อีกทั้ง มีโครงสร้างที่มีความพรุนสูง ซึ่งอาจช่วยลดความหนาแน่นและค่าการนำความร้อนของวัสดุได้



รูปที่ 1 CO₂e ระหว่างจีโอโพลิเมอร์กับปูนซีเมนต์ทั่วไป [3-5]

นอกจากนี้ ในประเทศไทยมีเถ้าชานอ้อยเกิดขึ้นปีละประมาณ 0.6 ล้านตัน [8] การนำมาใช้เป็นวัสดุในอิฐจีโอโพลิเมอร์จึงเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหลือทิ้งและลดปัญหาสิ่งแวดล้อมไปพร้อมกัน ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการพัฒนาอิฐจีโอโพลิเมอร์ให้มีคุณสมบัติด้านการป้องกันความร้อนที่ดีขึ้น โดยใช้เถ้าลอย เถ้าชานอ้อย และดินขาวเผาเป็นวัตถุดิบหลัก โดยมีวัตถุประสงค์ของงานวิจัยประกอบด้วย 1) เพื่อศึกษาผลของปริมาณเถ้าชานอ้อยต่อค่าการนำความร้อนและกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ 2) เพื่อพัฒนาประสิทธิภาพในการป้องกันความร้อนของอิฐจีโอโพลิเมอร์ที่ผสมเถ้าลอยกับดินขาวเผาโดยใช้เถ้าชานอ้อย และ 3) เพื่อเปรียบเทียบความคุ้มค่าในการผลิตอิฐจีโอโพลิเมอร์ที่ใช้เถ้าลอยผสมดินขาวเผาและเถ้าชานอ้อยกับอิฐทั่วไปชนิดอื่นๆ

2. ขั้นตอนการทดลอง

การศึกษานี้ได้ดำเนินการทดลองอย่างเป็นระบบตามขั้นตอนต่างๆ โดยครอบคลุมทั้งการเตรียมและการวิเคราะห์ปอชโซลานตั้งแต่ต้น การสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์ การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและเชิงกล และการวิเคราะห์ความเหมาะสมในการนำไปใช้งาน

2.1 ขั้นตอนการเตรียมวัสดุในการทดลอง

วัสดุที่ใช้ในการศึกษานี้ประกอบด้วยเถ้าลอย (FA) Class F (โรงงานไฟฟ้า จระยอง ประเทศไทย) และเถ้าขานอ้อย (BA) ที่ได้จากโรงงานน้ำตาลในภาคกลางของประเทศไทย นอกจากนี้ยังใช้ดินขาวเผา (MK) ซึ่งได้จากดินขาวจังหวัดระนอง ประเทศไทย เป็นวัตถุดิบหลักในการสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์ วัสดุทั้งสามชนิดถูกบดจนมีขนาดอนุภาคผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 (45 ไมโครเมตร)

สารละลายอัลคาไลน์ที่ใช้ประกอบด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ความเข้มข้น 10 โมลาร์ และสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ชนิดที่ 2 (Na_2O 15.35%, SiO_2 33.3% และ H_2O 51.81%)

วัสดุเพิ่มเติมที่ใช้เป็นมวลรวมได้แก่ทรายแม่น้ำ ซึ่งถูกนำมาร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 16 (1.18 มิลลิเมตร)

2.2 ขั้นตอนการวิเคราะห์วัสดุตั้งต้น

2.2.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุตั้งต้น ดำเนินการด้วยเทคนิค X-ray Fluorescence (XRF) ตามมาตรฐาน ASTM C114 เพื่อประเมินปริมาณออกไซด์หลัก ได้แก่ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 ตามเกณฑ์มาตรฐาน ASTM C618 ผลการวิเคราะห์ตามตารางที่ 1 พบว่า เถ้าลอยและดินขาวเผามีผลรวมของออกไซด์ทั้งสามสูงถึง 91.66% และ 94.69% ตามลำดับ แสดงถึงศักยภาพที่ดีในการเป็นวัสดุหลักสำหรับการสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์ ส่วนเถ้าขานอ้อย แม้มีปริมาณซิลิกาสูงแต่มีอะลูมิเนียมอยู่ในระดับต่ำ จึงไม่เหมาะสมที่จะใช้เป็นวัสดุตั้งต้นหลัก แต่สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุเสริม ผสมเพิ่มเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติเฉพาะได้

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุตั้งต้น (% โดยน้ำหนัก)

องค์ประกอบ	เถ้าลอย	เถ้าขานอ้อย	ดินขาวเผา
SiO_2	67.50	63.10	53.52
Al_2O_3	20.04	2.91	39.76
Fe_2O_3	4.12	2.07	1.41
CaO	1.40	2.49	0.06
MgO	0.53	1.97	0.15
SO_3	0.26	0.20	0.03
Na_2O	0.30	0.20	0.04
K_2O	1.14	2.45	2.34
P_2O_5	0.36	1.72	0.03
TiO_2	1.28	0.21	0.06
MnO	0.05	0.21	0.07
ZrO_2	0.07	0.02	-
BaO	0.06	0.05	-
SrO	0.07	0.02	-
Rb_2O	-	-	0.08
ZnO	0.02	-	-
LOI	2.81	22.30	2.46

ทั้งนี้อัตราส่วนระหว่าง SiO_2 ต่อ Al_2O_3 ยังเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อโครงสร้างภายในและสมบัติเชิงวิศวกรรมของจีโอโพลิเมอร์ โดยควรมีอัตราส่วน Si/Al อยู่ในช่วง 1.5–2.5 ตามงานวิจัยของ Wang et al. [9] เพื่อให้ได้โครงสร้างเจลที่มีความเสถียร และในกรณีที่ต้องการความทนทานต่ออุณหภูมิสูง ควรมีอัตราส่วนใกล้เคียง 3 ตามแนวคิดของ Davidovits (1994) [1] โดยเถ้าลอยที่มีอัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ประมาณ 3.37 จึงมีความเหมาะสมอย่างยิ่งต่อการสังเคราะห์วัสดุจีโอโพลิเมอร์ที่ทนความร้อนสูง เนื่องจากมีปริมาณอะลูมิเนียมเพียงพอที่จะทำหน้าที่เป็นตัวกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยาและเชื่อมโยงโครงสร้างเจลอย่างมีประสิทธิภาพ ส่วนดินขาวเผาที่มีอัตราส่วนต่ำเพียง 1.34 ทำให้เหมาะสำหรับ



ปรับสมดุล Si/Al ในระบบ เพื่อลดอัตราส่วนลงให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม

ในทางตรงกันข้าม แก๊ซอานอัยที่มีอัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ สูงถึง 21.68 ซึ่งเกินช่วงที่เหมาะสมอย่างมีนัยสำคัญ จัดอยู่ในกลุ่มวัสดุที่มีซิลิกาสูง (High-silica Material) ที่ส่งผลให้มีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยา (Reactivity) ต่ำกว่าวัสดุพอลิซิลานอื่น เนื่องจากกลไกการสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์ โครงสร้าง Si-O-Al จะก่อตัวขึ้นในลำดับแรก เนื่องจาก Al^{3+} มีประจุที่สูงกว่า และสามารถเหนี่ยวนำการเกิดปฏิกิริยาได้ง่ายกว่า Si^{4+} ส่วนพันธะ Si-O-Si จะเกิดในลำดับถัดไป เนื่องจากต้องใช้พลังงานกระตุ้นสูงกว่า ทำให้การสลายโครงสร้างซิลิเกตและการก่อตัวของเจลจีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer Gel Formation) เกิดขึ้นได้ช้า ส่งผลให้ต้องใช้เวลานานกว่าในการบ่มแข็งและอาจได้กำลังอัดต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุที่มีอัตราส่วน Si/Al ในช่วงที่เหมาะสม

อย่างไรก็ตาม แม้ว่าจะไม่เหมาะแก่การใช้เป็นวัสดุหลักเดี่ยว แต่เมื่อใช้ร่วมกับวัสดุพอลิซิลานอื่นในสัดส่วนที่เหมาะสม จะช่วยเพิ่มปริมาณซิลิกาในระบบและเสริมสมบัติเฉพาะบางประการของจีโอโพลิเมอร์ โดยเฉพาะในด้านการลดความหนาแน่น ซึ่งส่งผลดีต่อสมบัติการเป็นฉนวนความร้อน ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาวัสดุก่อสร้างสมรรถนะสูงได้

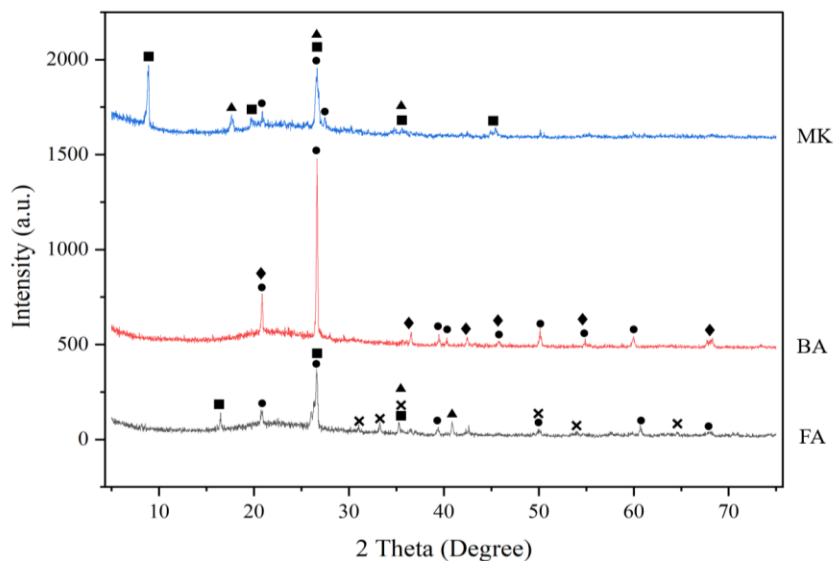
2.2.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ด้วยเทคนิค X-ray Diffraction (XRD) โดยใช้ $\text{CuK}\alpha$ Radiation (ที่ความต่างศักย์ 40 kV และกระแส 35 mA) ตั้งค่า Step Size ที่ 0.02° พร้อมเวลาต่อหนึ่ง Step ที่ 0.4 วินาที ภายใต้ช่วงการสแกน $5^\circ - 80^\circ$ ตามมาตรฐาน ASTM C1365 แสดงดังรูปที่ 2

ผลวิเคราะห์ XRD แสดงความแตกต่างของโครงสร้างวัสดุตั้งต้น โดยแก๊ลลอยมีลักษณะอะสัณฐานสูงสังเกตจาก Broad Hump ในช่วง 2θ ระหว่าง $15-35^\circ$ ซึ่งเอื้อต่อการเกิดปฏิกิริยา แก๊ซอานอัยมีโครงสร้างผลึกสูง โดยมีพีคของควอตซ์และคริสโตบาไลต์ที่ชัดเจน ส่วนดินขาวเผามีลักษณะโครงสร้างกึ่งอะสัณฐานผสมกับโครงสร้างผลึก ความแตกต่างนี้ส่งผลโดยตรงต่อความไวในการทำปฏิกิริยากับสารละลายต่าง

2.2.3 การวิเคราะห์ลักษณะทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ตามมาตรฐาน ASTM C1723 ร่วมกับ Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDX) แสดงดังในรูปที่ 3 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วย SEM แสดงความแตกต่างทางกายภาพที่ชัดเจน โดยแก๊ลลอยมีอนุภาครูปร่างค่อนข้างกลม (Spherical Shape) ซึ่งช่วยให้มีอัตราไหลตัวได้ดี และเพิ่มความหนาแน่นของวัสดุ แก๊ซอานอัยมีโครงสร้างรูพรุนสูง อนุภาคไม่สม่ำเสมอและมีพื้นผิวขรุขระ ส่วนดินขาวเผามีโครงสร้างเป็นแผ่นบางซ้อนทับกัน (Platelet) มีขนาดอนุภาคเล็ก ($<2 \mu\text{m}$) ซึ่งเอื้อต่อการละลายของอะลูมินาและซิลิกาในสารละลายต่าง ลักษณะเฉพาะเหล่านี้มีอิทธิพลโดยตรงต่อคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์ที่ได้

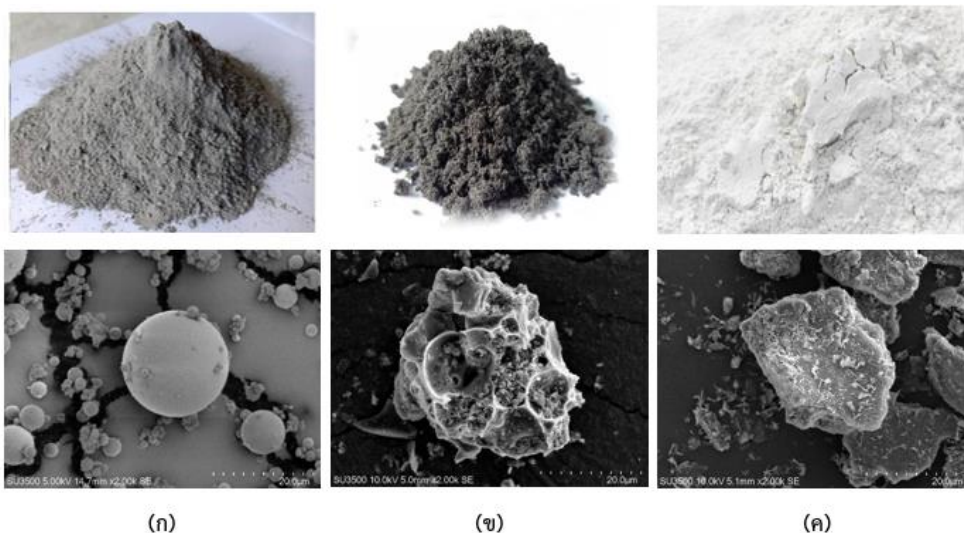
2.3 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง

การศึกษานี้กำหนดสัดส่วนผสมโดยใช้ปริมาณแก๊ซอานอัยแตกต่างกันที่ 0% 10% 20% และ 30% โดยน้ำหนัก เพื่อแทนที่แก๊ลลอย และมีการกำหนดใช้รหัสสูตรผสมเป็น BA0 BA10 BA20 และ BA30 ตามลำดับ ทั้งนี้ในทุกสูตรได้กำหนดให้ใช้ดินขาวเผาปริมาณคงที่ 20% ของวัสดุพอลิซิลานทั้งหมด โดยมีรายละเอียดสัดส่วนการผสม $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ แสดงดังตารางที่ 2



หมายเหตุ: ● = Quartz (SiO_2 , JCPDS 01-089-8934), ■ = Muscovite ($\text{KAl}_2 \cdot \text{AlSi}_3\text{O}_{10} \cdot \text{OH}_2$, JCPDS 00-007-0025),
▲ = Mullite ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$, JCPDS 00-001-1059), ✕ = Hematite (Fe_2O_3 , JCPDS 00-001-1053),
◆ = Cristobalite (SiO_2 , JCPDS 00-003-0257)

รูปที่ 2 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของถ้ำลอย ถ้ำซานอ้อย และดินขาวเผา



รูปที่ 3 โครงสร้างจุลภาค ของ (ก) ถ้ำลอย (ข) ถ้ำซานอ้อย และ (ค) ดินขาวเผา ที่กำลังขยาย 2000 เท่า



ตารางที่ 2 อัตราส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยและดินขาวผสมกับเถ้าขาน้อย

Mix	FA (g)	BA (g)	MK (g)	NaOH 10M (g)	Na ₂ SiO ₃ (g)	Sand (g)	SiO ₂ : Al ₂ O ₃
BA0 (Control)	500	0	100	300	300	1,200	2.34
BA10	450	50	100	300	300	1,200	2.58
BA20	400	100	100	300	300	1,200	2.85
BA30	350	150	100	300	300	1,200	3.16

ก่อนการผสม เถ้าขาน้อยจะถูกกระตุ้นให้ไวต่อการเกิดปฏิกิริยาด้วยการแช่ในสารละลาย NaOH 10 โมลาร์ ตามวิธีการของ Kittisayarn et al. [10] โดยเป็นกระบวนการสลายโครงสร้างซิลิเกตออสติฐาน ที่ทำให้เกิดไอออน $\text{Si}(\text{OH})_4$ และ $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ บนพื้นผิว ซึ่งเป็นขั้นตอนที่จำเป็นสำหรับการสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์ที่มีประสิทธิภาพ จากนั้นจึงผสมกับวัสดุปอซโซลานอื่นๆ แล้วค่อยเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกตที่ทำหน้าที่เสริมปริมาณซิลิกาในระบบ อันเป็นองค์ประกอบหลักในการกระตุ้นโครงสร้างเจลชนิด N-A-S-H (Sodium Alumino-Silicate Hydrate gel) ของจีโอโพลิเมอร์ จากนั้นผสมให้เข้ากันดีแล้วจึงเติมทราย สุดท้ายนำส่วนผสมเทลงในแบบหล่อขนาด $2.5 \times 2.5 \times 2.5$ ซม.³. (สำหรับทดสอบกำลังอัด) และขนาด $15 \times 15 \times 2.5$ ซม.³. (สำหรับทดสอบค่าการนำความร้อน) เขย่าแบบหล่อเพื่อไล่ฟองอากาศ บ่มที่อุณหภูมิห้อง ($25 \pm 2^\circ\text{C}$) เป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นถอดแบบ และบ่มต่อจนถึงอายุทดสอบที่ 7 และ 28 วัน โดยเตรียมตัวอย่าง 3 ชิ้นต่อสูตรผสม และอายุทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C109

2.4 ขั้นตอนการทดสอบคุณสมบัติ

การทดสอบกำลังรับแรงอัดดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM C109 โดยใช้ตัวอย่างทรงลูกบาศก์ขนาด $2.5 \times 2.5 \times 2.5$ ซม.³ ที่อายุ 7 และ 28 วัน ด้วยอัตราการใช้แรงกด 1.4 kN/s ส่วนการทดสอบความหนาแน่น ความพรุน และการดูดซึมน้ำเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C642 ที่อายุ 28 วัน

ในด้านการทดสอบความสามารถในการต้านทานความร้อนสูงดำเนินการตามแนวทางของ RILEM TC 129-MHT โดยให้ความร้อนแก่ตัวอย่างที่อุณหภูมิ 500°C 800°C และ 1000°C ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ $2^\circ\text{C}/\text{นาที}$ และคงอุณหภูมิไว้ 2 ชั่วโมง การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนดำเนินการโดยใช้วิธี Guarded Hot Plate ตามมาตรฐาน ASTM C177 กับตัวอย่างแผ่นสี่เหลี่ยมขนาด $15 \times 15 \times 2.5$ ซม.³. ที่อายุ 28 วัน โดยตั้งค่าความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างด้านร้อนและด้านเย็นที่ 20°C

ส่วนโครงสร้างจุลภาคของตัวอย่างถูกวิเคราะห์ด้วย SEM/EDX ทั้งก่อนและหลังการให้ความร้อน เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงภายในโครงสร้างจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์ที่สัดส่วนผสมต่างๆ



2.5 ขั้นตอนการวิเคราะห์สัดส่วนผสมที่เหมาะสม

การวิเคราะห์หาสัดส่วนผสมที่เหมาะสมใช้วิธี การวิเคราะห์ดัชนีประสิทธิภาพ (Performance Index: PI) [11] โดยกำหนดตัวแปรควบคุม ได้แก่ ความเข้มข้น NaOH 10 โมลาร์, อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ 1:1, อุณหภูมิหมักที่อุณหภูมิห้อง และอายุทดสอบ 7 และ 28 วัน ตัวแปรต้น คือ ปริมาณเถ้าชานอ้อย 0% 10% 20% และ 30% ส่วนตัวแปรตาม ได้แก่ กำลังรับแรงอัด ค่าการนำความร้อน และความหนาแน่น ส่วนเกณฑ์การประเมินกำหนดให้กำลังอัดต้องไม่ต่ำกว่า 10.0 MPa (ตาม มอก.77-2565) และค่าการนำความร้อนควรลดลงอย่างน้อย 10% เทียบกับสูตรควบคุม

ดัชนีประสิทธิภาพ (PI) คำนวณโดยใช้สมการที่ 1:

$$PI = w_1(fc_{req}/fc) + w_2(\lambda_{ref}/\lambda) + w_3(\rho_{ref}/\rho) \quad (1)$$

เมื่อ	w_x	= ค่าถ่วงน้ำหนัก (0.4, 0.4, 0.2)
	fc	= กำลังอัดที่ทดสอบได้
	fc_{req}	= กำลังอัดตามมาตรฐาน
	λ	= ค่าการนำความร้อนที่ทดสอบได้
	λ_{ref}	= ค่าการนำความร้อนสูตรควบคุม
	ρ	= ความหนาแน่นที่ทดสอบได้
	ρ_{ref}	= ความหนาแน่นของสูตรควบคุม

2.6 ขั้นตอนการวิเคราะห์ความเหมาะสมในการนำไปใช้งาน

สูตรผสมที่ให้ผลการทดสอบดีที่สุดถูกนำมาขึ้นรูปเป็นอิฐจีโอโพลิเมอร์ขนาด 14×4×6.5 เซนติเมตร ตามมาตรฐาน มอก.77-2565 และทดสอบความปลอดภัยในการนำไปใช้งาน โดยการทดสอบพฤติกรรมการณ์ปลดปล่อยความเป็นด่าง (Alkalinity Leaching) ตามมาตรฐาน AS/NZS 4456.10 ส่วนการวิเคราะห์ความ

คุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ดำเนินการโดยคำนวณต้นทุนการผลิตต่อหน่วย (บาทต่อก้อน) และต่อหน่วยพื้นที่ (บาทต่อตารางเมตร) เปรียบเทียบกับอิฐชนิดอื่นในท้องตลาด ได้แก่ อิฐมอญ อิฐบล็อก และอิฐมวลเบา โดยพิจารณาทั้งด้านต้นทุน สมบัติทางกายภาพ สมบัติด้านการป้องกันความร้อน และความสามารถในการทนไฟ

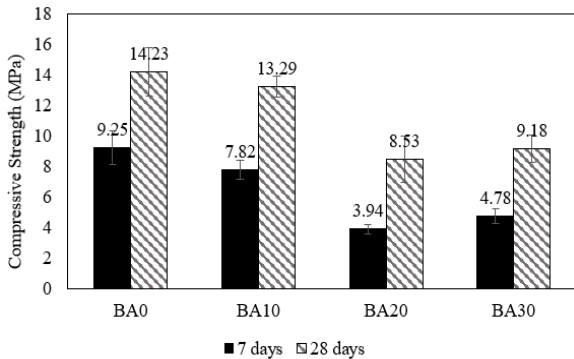
3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

3.1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ที่อายุ 7 และ 28 วัน แสดงในรูปที่ 4 ผลการทดสอบแสดงแนวโน้มที่ชัดเจนว่าการเพิ่มปริมาณเถ้าชานอ้อยส่งผลให้กำลังรับแรงอัดลดลง โดยที่อายุ 28 วัน สูตร BA0, BA10, BA20 และ BA30 มีค่ากำลังอัดเฉลี่ย 14.23, 13.29, 8.53 และ 9.18 MPa ตามลำดับ เฉพาะสูตร BA0 และ BA10 เท่านั้นที่มีกำลังอัดสูงกว่าเกณฑ์ขั้นต่ำตามมาตรฐาน มอก.77-2565 (10.0 MPa) ทั้งนี้การลดลงของกำลังอัดเกิดจากหลายปัจจัย ได้แก่ (1) การเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วน Si/Al ในระบบเมื่อเพิ่มเถ้าชานอ้อยที่มี $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ สูง (2) ความแตกต่างของลักษณะทางกายภาพระหว่างเถ้าชานอ้อยและเถ้าลอย รวมถึงการกระจายขนาดอนุภาค พื้นผิวจำเพาะ และความสามารถในการดูดซับ ส่งผลให้การสร้างเนื้อเยื่อของจีโอโพลิเมอร์ไม่เหมาะสมเท่าที่ควร และ (3) โครงสร้างแบบผลึกสูงของเถ้าชานอ้อยส่งผลให้มีอัตราการละลายของซิลิกาและอะลูมินาในสารละลายต่างต่ำกว่าเถ้าลอยที่มีโครงสร้างอสัณฐานสูง ทำให้การสร้างเจลจีโอโพลิเมอร์เกิดขึ้นช้าและไม่สมบูรณ์ ตามงานวิจัยของ Fernández-Jiménez et al. [12] ที่ระบุว่าวัสดุที่มีโครงสร้างอสัณฐานสูงเกิดปฏิกิริยาได้ดีกว่า



บทความวิจัย



รูปที่ 4 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์หลังบ่มที่อายุ 7 วัน และ 28 วัน

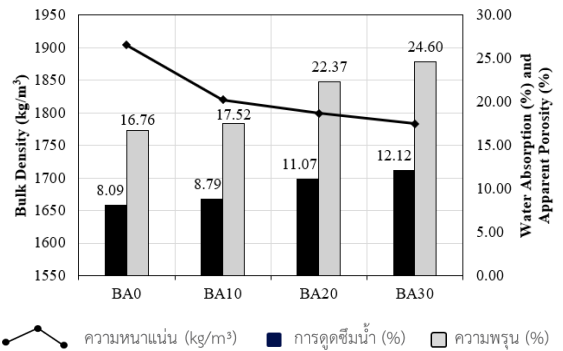
3.2 ผลการทดสอบความหนาแน่น ความพรุน และการดูดซึมน้ำ

ผลการทดสอบที่อายุ 28 วัน (รูปที่ 5) แสดงความสัมพันธ์แบบแปรผกผันระหว่างความหนาแน่นกับความพรุนและการดูดซึมน้ำ โดยการเพิ่มปริมาณเถ้าชานอ้อยส่งผลให้ความหนาแน่นลดลงเป็น 1,820 1,800 และ 1,780 kg/m³ สำหรับสูตร BA10 BA20 และ BA30 ตามลำดับ ในขณะที่การดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นเป็น 8.79% 11.07% และ 12.12% ตามลำดับ

ปรากฏการณ์นี้เกิดจากคุณลักษณะเฉพาะของเถ้าชานอ้อยที่มีรูพรุนสูง ส่งผลให้เกิดช่องว่างในโครงสร้างมากขึ้น และปริมาณของสารที่สลายไปจากการเผาไหม้ (Loss on Ignition: LOI) ที่สูงถึง 22.30% ยังเป็นตัวบ่งชี้ถึงปริมาณสารอินทรีย์และคาร์บอนที่ไม่เผาไหม้ ซึ่งจะสลายตัวระหว่างกระบวนการแข็งตัวของจีโอโพลิเมอร์ ส่งผลให้ช่วยลดความหนาแน่นและเพิ่มความพรุน

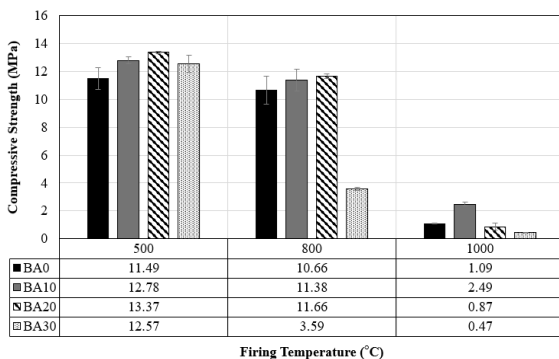
3.3 ผลการทดสอบความสามารถในการต้านทานความร้อน

ผลการทดสอบความต้านทานความร้อน (รูปที่ 6) พบว่าตัวอย่างทุกสูตรสามารถทนอุณหภูมิถึง 1000°C



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่น ความพรุน และการดูดซึมน้ำกับปริมาณเถ้าชานอ้อย

โดยไม่เกิดการแตกร้าวรุนแรง แม้กำลังอัดจะลดลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ที่น่าสนใจคือสูตร BA20 และ BA30 แสดงการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดที่อุณหภูมิ 500°C อย่างมีนัยสำคัญ (+56.7% และ +37.0% ตามลำดับ) ซึ่งแตกต่างจาก BA0 และ BA10 ที่กำลังลดลงตามพฤติกรรมปกติของวัสดุเมื่อได้รับความร้อน การเพิ่มขึ้นของกำลังนี้คาดว่าเกิดจากกลไกสำคัญ 2 ประการ ได้แก่ (1) การเผาผลิกทางความร้อน (Thermal Crystallization) ของซิลิกาในเถ้าชานอ้อยที่เปลี่ยนโครงสร้างจากซิลิกาอสัณฐาน (Amorphous Silica) เป็นโครงสร้างผลึก (Crystalline) เช่น ควอตซ์ และคริสโตบาลิต ตามงานวิจัยของ Zhang et al. [13] และ (2) การเผาเชื่อมของอนุภาค (Particle Sintering) ที่ก่อให้เกิดการยึดเกาะระหว่างอนุภาคดีขึ้น โดยกลไกเหล่านี้จะเกิดขึ้นได้เมื่อมีปริมาณเถ้าชานอ้อยเพียงพอ ($\geq 20\%$) ที่ทำหน้าที่เป็นแหล่งของซิลิกาอิสระสำหรับการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างที่อุณหภูมิ 500°C ในขณะที่สูตร BA10 มีปริมาณเถ้าชานอ้อยไม่เพียงพอที่จะเกิดกลไกดังกล่าว จึงแสดงพฤติกรรมการลดลงของกำลังเช่นเดียวกับ BA0

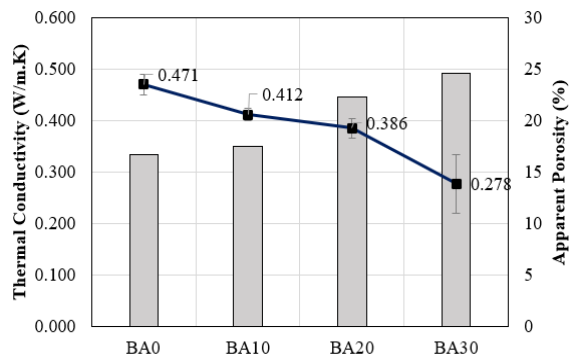


รูปที่ 6 ค่ากำลังรับแรงอัดหลังการเผาที่อุณหภูมิต่างๆ

หลังการเผาที่อุณหภูมิสูงเกิน 800°C สูตร BA20 และ BA30 เกิดการพองตัวคล้ายฟองน้ำ ซึ่งอธิบายได้ด้วยทฤษฎี Viscous Sintering โดย Fernández-Jiménez et al. [12] ที่อธิบายไว้ว่า ณ อุณหภูมิสูงกว่า 800°C ซิลิกาในจีโอโพลิเมอร์จะเริ่มหลอมเหลวและเกิดการเผาผลึก โดยเฉพาะในสูตรที่มีสัดส่วนปริมาณซิลิกาสูง จะเกิดพันธะ Si-O-Si แทนพันธะ Al-O-Si ทำให้โครงสร้างใกล้เคียงกับแก้ว ดังนั้นสูตร BA10 จึงเป็นสูตรที่แสดงเสถียรภาพที่ดีที่สุดหลังการเผาที่อุณหภูมิสูง โดยสามารถรักษากำลังไว้ได้สูงกว่าสูตรอื่น

3.4 ผลการทดสอบสัมประสิทธิ์การนำความร้อน

ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (รูปที่ 7) แสดงถึงประสิทธิภาพของเก้าชาน้อยในการลดการนำความร้อน โดยค่าการนำความร้อนลดลงจาก 0.471 W/m·K ในสูตรควบคุม เหลือ 0.411 0.386 และ 0.277 W/m·K สำหรับสูตร BA10 BA20 และ BA30 ตามลำดับ คิดเป็นการลดลง 12.8% 18.1% และ 41.1% ซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับการเพิ่มขึ้นของความพรุน ทั้งนี้สูตร BA30 มีค่าการนำความร้อนใกล้เคียงกับอิฐมวลเบา AAC (0.16-0.28 W/m·K) และต่ำกว่าอิฐมอญและอิฐบล็อกทั่วไป (0.8-0.9 W/m·K) อย่างมีนัยสำคัญ



รูปที่ 7 ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน

3.5 ผลการวิเคราะห์สัดส่วนผสมที่เหมาะสม

ผลการวิเคราะห์ดัชนีประสิทธิภาพ (PI) โดยให้ค่าถ่วงน้ำหนักแก่กำลังรับแรงอัด ค่าการนำความร้อน และความหนาแน่น ในสัดส่วน 0.4 0.4 และ 0.2 ตามลำดับ (ตารางที่ 3) พบว่าสูตร BA30 มีค่า PI สูงสุดที่ 1.26 แสดงถึงความสมดุลระหว่างคุณสมบัติทั้งสาม แต่อย่างไรก็ตาม ยังต้องพิจารณาระหว่างคุณสมบัติด้านการป้องกันความร้อนและคุณสมบัติเชิงกลอื่นๆ ด้วย

เมื่อพิจารณาปัจจัยด้านกำลังอัดที่ต้องผ่านเกณฑ์มาตรฐานและความทนทานต่อความร้อน สูตร BA10 มีความเหมาะสมมากที่สุด โดยมี PI ที่ดี (1.20) มีกำลังอัดสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานถึง 32.9% ค่าการนำความร้อนลดลง 12.8% และมีความทนทานต่อความร้อนสูง โดยรักษากำลังไว้ได้ 18.7% ที่อุณหภูมิ 1000°C

การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคหลังผ่านการให้ความร้อน (รูปที่ 8) ยืนยันว่าสูตร BA10 มีเสถียรภาพที่ดีที่สุด โดยแสดงให้เห็นถึงการกระจายรูพรุนที่เหมาะสม โดยมีรูพรุนขนาดเล็ก (1-8 μm) กระจายเท่าๆ กัน ซึ่งช่วยรักษาความแข็งแรงและป้องกันการแตกร้าวแม้ที่อุณหภูมิสูง ในขณะที่สูตร BA20 และ BA30 มีรูพรุนขนาดใหญ่ที่เชื่อมต่อกัน (15-50+ μm) ซึ่งสร้างเส้นทาง



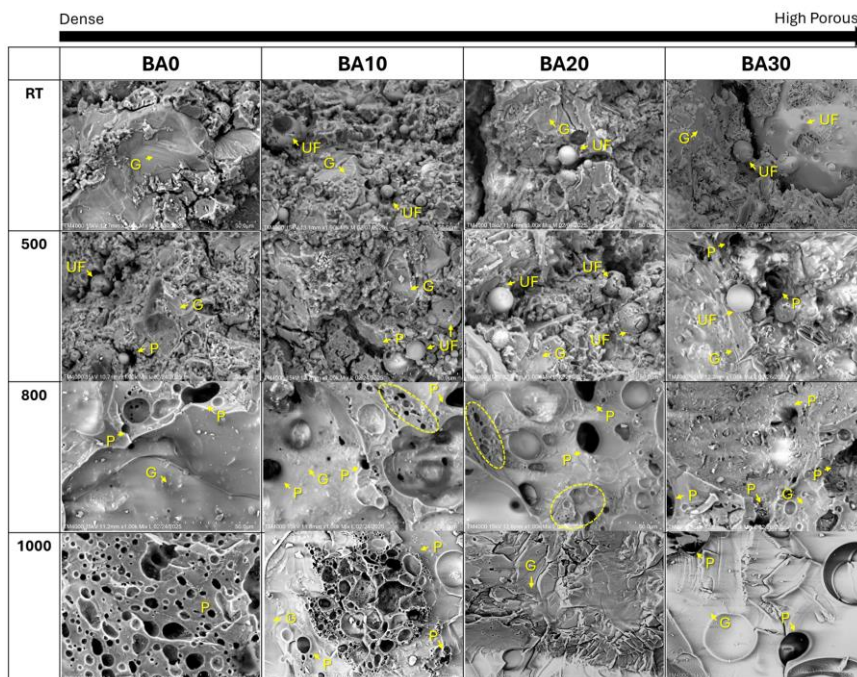
การแตกร้าวและลดความแข็งแรงของโครงสร้าง ประกอบกับการเกิดเฟสแก้ว (Glassy Phase) ที่มากเกินไป จากการหลอมตัวของซิลิกาที่อุณหภูมิสูง ซึ่งเมื่อเย็นตัวลงอย่างรวดเร็วจะทำให้โครงสร้างมีความเปราะสูง ส่งผลให้เกิดจุดอ่อนทางโครงสร้าง โดย

การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางจุลภาคเหล่านี้ สอดคล้องกับผลการทดสอบที่พบว่า BA10 สามารถรักษากำลังอัด ไว้ได้ 18.7% ที่อุณหภูมิ 1000°C ขณะที่ BA20 และ BA30 มีการสูญเสียกำลังอัด มากกว่า

ตารางที่ 3 ดัชนีประสิทธิภาพของสูตรผสมต่างๆ

เถาขานอัย (%)	กำลังอัด (MPa)	ค่าการนำความร้อน (W/m·K)	ความหนาแน่น (kg/m ³)	ดัชนีประสิทธิภาพ
	w ₁ = 0.4	w ₂ = 0.4	w ₃ = 0.2	
0%	14.23 (1.42)	0.471 (1.00)	1900 (1.00)	1.17
10%	13.29 (1.33)	0.411 (1.14)	1820 (1.04)	1.20
20%	8.53 (0.85)	0.386 (1.22)	1800 (1.05)	1.04
30%	9.18 (0.92)	0.277 (1.70)	1780 (1.07)	1.26

หมายเหตุ: ค่าในวงเล็บคือค่าที่ Normalize แล้ว



Remarks: G = Geopolymer gel, UF = Unreacted fly ash, P = Pore

รูปที่ 8 โครงสร้างจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์หลังการให้ความร้อน ที่กำลังขยาย 1000 เท่า

3.4 ผลการวิเคราะห์ที่เหมาะสมในการนำไปใช้งาน

ผลการทดสอบคุณสมบัติของอิฐจีโอโพลิเมอร์สูตร BA10 (ตารางที่ 4) แสดงว่าผ่านเกณฑ์มาตรฐาน มอก. 77-2565 ทุกด้าน โดยมีค่าความต้านแรงอัดเฉลี่ย 13.29 MPa (สูงกว่าเกณฑ์ขั้นต่ำ 32.9%) และค่าการดูดซึมน้ำเฉลี่ยเพียง 8.79% (ต่ำกว่าเกณฑ์มาก) ผลการทดสอบพฤติกรรมการปลดปล่อยความเป็นต่างของอิฐจีโอโพลิเมอร์สูตร BA10 พบว่าค่า pH ของน้ำกลั่นที่ใช้แช่ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ลดลงอย่างมีนัยสำคัญจาก 11.70 ในวันแรก เหลือ 10.92 ในวันที่ 9 โดยพบว่าในช่วง 7 วันแรก ค่า pH ลดลงอย่างชัดเจนก่อนที่อัตราการลดลงจะชะลอตัวในช่วงปลายของการทดสอบ แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มที่จะเข้าสู่ภาวะสมดุลทางเคมีของวัสดุ โดยพฤติกรรมดังกล่าวเป็นผลจากการชะล้างของสารต่างตกค้างที่ลดลงตามเวลา ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าอิฐจีโอโพลิเมอร์สูตรดังกล่าวจะมีเสถียรภาพทางเคมีเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป และมีศักยภาพในการนำไปใช้งานเป็นวัสดุก่อสร้างได้อย่างปลอดภัยโดยไม่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อผู้ใช้งานหรือสิ่งแวดล้อม

การวิเคราะห์ต้นทุนและการเปรียบเทียบคุณสมบัติกับอิฐชนิดอื่น แสดงได้ดังตารางที่ 5 โดยพบว่าอิฐจีโอโพลิเมอร์สูตร BA10 มีต้นทุนในการผลิตเฉลี่ยประมาณ 4 บาทต่อก้อน โดยมีคุณสมบัติด้านการป้องกันความร้อนที่ดีกว่าอิฐมอญและอิฐบล็อกจากอย่างชัดเจน (ค่า

การนำความร้อน 0.411 W/m·K เทียบกับ 0.700-0.900 W/m·K) ในด้านกำลังรับแรงอัด อิฐสูตร BA10 มีค่าอยู่ที่ 13.29 MPa ซึ่งมีประสิทธิภาพดีใกล้เคียงกับอิฐมอญ (15.0 MPa) และดีกว่าอิฐบล็อก (11.0 MPa) และอิฐมวลเบา (7.0 MPa) ส่วนการดูดซึมน้ำของอิฐสูตร BA10 พบว่ามีค่าอยู่ที่ 8.79% ซึ่งเหมาะสำหรับการใช้งานในสภาพแวดล้อมที่ต้องการความทนทานสูง รวมทั้งมีความสามารถในการทนไฟได้นานกว่า 4 ชั่วโมง เทียบกับอิฐมอญ (2 ชั่วโมง) และอิฐมวลเบา (4 ชั่วโมง) ทั้งนี้แม้จะมีคุณสมบัติทางเทคนิคที่เหนือกว่า แต่เพื่อประเมินศักยภาพในการนำไปใช้งานในเชิงพาณิชย์อย่างครอบคลุม การวิเคราะห์ SWOT จึงมีความจำเป็น

จากการวิเคราะห์ SWOT พบจุดแข็งสำคัญของอิฐจีโอโพลิเมอร์ คือคุณสมบัติด้านการป้องกันความร้อนที่ดี มีค่ากำลังรับแรงอัดสูง และปล่อย CO₂ ในกระบวนการผลิตต่ำ จุดอ่อนคือต้นทุนที่สูงกว่าอิฐทั่วไป และยังไม่เป็นที่รู้จักในท้องตลาด ส่วนด้านโอกาส อิฐจีโอโพลิเมอร์มีความสอดคล้องกับแนวโน้มความต้องการของตลาดวัสดุก่อสร้างที่ให้ความสำคัญกับความยั่งยืนและการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ขณะที่อุปสรรคสำคัญของการพัฒนาวัสดุดังกล่าว คือ การแข่งขันกับผลิตภัณฑ์เดิมที่มีต้นทุนต่ำและเป็นที่ยอมรับในตลาดมาอย่างยาวนาน ตลอดจนข้อจำกัดด้านมาตรฐานและข้อกำหนดทางวิศวกรรมที่ยังไม่ครอบคลุมวัสดุทางเลือกประเภทจีโอโพลิเมอร์

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและเชิงกลของจีโอโพลิเมอร์เทียบกับ มอก.77-2565

สมบัติ	มอก.77-2565	อิฐ BA10
ความต้านทานแรงอัดเฉลี่ย (MPa)	10.0 - 21.0	13.29 ± 0.7
ความต้านทานแรงอัดแต่ละก้อน (MPa)	9.0 - 17.0	12.59 - 14.0
การดูดซึมน้ำเฉลี่ย (%)	17.0 - 22.0	8.79 ± 1.2
ความหนาแน่นเชิงปริมาตร (kg/m ³)	-	1,820 ± 44

ตารางที่ 5 การเปรียบเทียบราคาและคุณสมบัติของอิฐชนิดต่างๆ

ปัจจัย	อิฐสูตร BA10	อิฐมอญ	อิฐบล็อก	อิฐมวลเบา
ราคา (บาท/ก้อน)	4	1.5-2.2	5.5-7.0	23-28
ความหนาแน่นเฉลี่ย (kg/m ³)	1,820	1,900	2,000	1,000
ค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ย (MPa)	13.29	15.0	11.0	7.0
การดูดซึมน้ำเฉลี่ย (%)	8.79	20.0	8.0	15.0
ค่าการนำความร้อน (W/m·K)	0.411	0.700	0.900	0.280
ความสามารถต้านทานไฟ (ชั่วโมง)	>4	2	1	4
จำนวนก้อน/ตร.ม.	134-178	134	12.5	8.3
ราคาต่อตารางเมตร	536-712	201-295	69-88	191-232

4. สรุปผลการวิจัย

การวิจัยนี้มุ่งพัฒนาอิฐโพลิเมอร์ที่มีประสิทธิภาพในการป้องกันความร้อนโดยใช้เถ้าชานอ้อยเป็นวัสดุเสริมในอิฐโพลิเมอร์ที่ทำจากเถ้าลอยผสมกับดินขาว เฝ ผลการวิจัยพบความสัมพันธ์ที่ชัดเจนระหว่างปริมาณเถ้าชานอ้อยกับคุณสมบัติของอิฐโพลิเมอร์ โดยการเพิ่มปริมาณเถ้าชานอ้อยจาก 0% เป็น 30% ส่งผลให้ค่าการนำความร้อนลดลงอย่างมีนัยสำคัญถึง 41.1% ขณะที่ความหนาแน่นลดลงและความพรุนเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม กำลังอัดมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณเถ้าชานอ้อยที่เพิ่มขึ้น ยกเว้นในสูตร BA30 ที่มีกำลังอัดสูงกว่า BA20 เล็กน้อย

จากการวิเคราะห์ดัชนีประสิทธิภาพและปัจจัยทางวิศวกรรม พบว่าอิฐโพลิเมอร์สูตร BA10 เป็นสูตรที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากสามารถลดค่าการนำความร้อนลง 12.8% เมื่อเทียบกับสูตรควบคุม ขณะที่ยังรักษากำลังอัดให้สูงกว่าเกณฑ์มาตรฐาน มอก.77-2565 ถึง 32.9% นอกจากนี้ ยังมีค่าการดูดซึมน้ำเพียง 8.79% และมีความทนทานต่อความร้อนสูงโดยรักษากำลังไว้ได้ 18.7% ที่อุณหภูมิ 1000°C ซึ่งเหนือกว่าวัสดุก่อสร้างทั่วไปอย่างมีนัยสำคัญ

การวิเคราะห์ต้นทุนและเปรียบเทียบคุณสมบัติพบว่า อิฐโพลิเมอร์สูตร BA10 มีต้นทุนประมาณ 4 บาทต่อก้อน แม้จะมีต้นทุนต่อตารางเมตรสูงกว่าอิฐชนิดอื่น แต่มีคุณสมบัติด้านการป้องกันความร้อนที่ดีกว่าอย่างชัดเจน (ค่าการนำความร้อน 0.411 W/m·K เทียบกับ 0.700-0.900 W/m·K ของอิฐมอญและอิฐบล็อก) มีความแข็งแรงสูงกว่าอิฐมวลเบา (กำลังรับแรงอัดที่ 13.29 MPa เทียบกับ 7 MPa) และมีความทนไฟสูงกว่า 4 ชั่วโมง เทียบกับอิฐมอญ (2 ชั่วโมง) และ อิฐบล็อก (1 ชั่วโมง)

นอกจากนี้ ยังพบว่าที่อุณหภูมิ 500°C อิฐสูตรที่มีเถ้าชานอ้อยสูงมีแนวโน้มเพิ่มกำลังอัดซึ่งเกิดจากการเผาผลึก (Sintering) โดยเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจาก Semi-crystalline เป็น Crystalline อย่างสมบูรณ์

งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นศักยภาพของอิฐโพลิเมอร์ในการเป็นวัสดุก่อสร้างที่ทนความร้อน มีความแข็งแรง และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมโดยช่วยลดการปล่อย CO₂ จากปูนซีเมนต์ได้อย่างยั่งยืน



5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณบริษัท ทอรัส พอซโซลานซ์ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ถ้ำลอยสำหรับใช้ในงานวิจัย และขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม ศูนย์วิจัยพัฒนาวัสดุวิศวกรรม ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลองเพื่อให้งานวิจัยครั้งนี้เสร็จสมบูรณ์ด้วยดี

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] J. Davidovits, Properties of geopolymers cements, The 1st International Conference on Alkaline Cements and Concretes, Proceedings, 1994, 131-149.
- [2] C. Tippayasam, P. Keawpapasson, P. Thavorniti, T. Panyathanmaporn, C. Leonelli and D. Chaysuwan, Effect of Thai kaolin on properties of agricultural ash blended geopolymers, Construction and Building Materials, 2014, 53, 455-459.
- [3] P. Cong, R. Du, H. Gao and Z. Chen, Comparison and assessment of carbon dioxide emissions between alkali-activated materials and OPC cement concrete, Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2024, 11(5), 918-938.
- [4] J. Zhang, S. Fernando, D.W. Law, C. Gunasekara, S. Setunge, M. Sandanayake and G. Zhang, Life cycle assessment for geopolymers concrete bricks using brown coal fly ash, Sustainability, 2023, 15(9), 7718.
- [5] L.K. Turner and F.G. Collins, Carbon dioxide equivalent (CO₂-e) emissions: A comparison between geopolymer and OPC cement concrete, Construction and Building Materials, 2013, 43, 125-130.
- [6] W. M. W. Ibrahim, M. M. A. B. Abdullah, K. Hussin, A. A. Kadir, and R. Ahmad, Technological properties of fly ash-based lightweight geopolymer brick, Lecture Notes in Civil Engineering, 2021, 129, 25-50.
- [7] K.A.M. El Naggat, M.M. Abd El-Razik, M. Kuku, M. Arishi, I.M. Maafa, A. Yousef and E.M. Abdel Hamid, Performance of geopolymer insulation bricks synthesized from industrial waste, Minerals, 2024, 14(10), 977.
- [8] S. Siriruekratana and N. Supakata, Development of geopolymer bricks from synergistic use of bagasse ash and concrete residue as an alternative for industrial waste management, Naresuan University Journal of Science and Technology, 2017, 25(4), 69-78.



- [9] Y. Wang, X. Liu, W. Zhang, Z. Li, Y. Zhang, Y. Li, and Y. Ren, Effects of Si/Al ratio on the efflorescence and properties of fly ash based geopolymer, *Journal of Cleaner Production*, 2020, 244(3), 118852.
- [10] P. Kittisayarm, T. Pantongsuk, A. Srikhacha, D. Chaysuwan and C. Tippayasam, Development of high-strength geopolymers by high-reactive bagasse ash, *The Journal of Industrial Technology*, 2020, 16(3), 66-79. (in Thai)
- [11] R.S. Kaplan and D.P. Norton, The balanced scorecard: Measures that drive performance, *Harvard Business Review*, 2005, 83(7-8), 172.
- [12] A. Fernández-Jiménez, A. Palomo and M. Criado, Microstructure development of alkali-activated fly ash cement: A descriptive model, *Cement and Concrete Research*, 2005, 35(6), 1204-1209.
- [13] H.Y. Zhang, V.R. Kodur, B. Wu, L. Cao and F. Wang, Thermal behavior and mechanical properties of geopolymer mortar after exposure to elevated temperatures, *Construction and Building Materials*, 2016, 109, 17-24.