

การศึกษาเปรียบเทียบการใช้เฟจีดีอีปซั่มและแคลเซียมซัลเฟตต่อสมบัติเชิงกลและการหดตัวแห้ง ของวัสดุอัลคาไลแอคทีฟจากเถ้าลอยแคลเซียมสูง

Comparative Study using FGD-Gypsum and Calcium Sulfate on Mechanical Properties and Drying Shrinkage of Alkali-Activated High-Calcium Fly Ash Mortar

สกวรรณ ห่านจิตสุวรรณ์^{1,*} บวรรัก อินทร์จ่อหอ² ชัตติย ชมพวงค์³ ชูตากัก เดชพันธ์⁴ ศตคุณ เดชพันธ์⁵ และ ธนากร ภูเงินคำ⁶

¹สาขาวิชาเทคโนโลยีโยธา คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏรำปาง จ.ลำปาง

^{2,3,4,5,6}หน่วยวิจัยเทคโนโลยีวัสดุก่อสร้างอย่างยั่งยืน สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

จ.นครราชสีมา

*Corresponding author; E-mail address: yim_kachan@yahoo.com, hanjitsuwan@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการเปรียบเทียบผลของเฟจีดีอีปซั่มและแคลเซียมซัลเฟตต่อสมบัติเชิงกลและการหดตัวแห้งของวัสดุอัลคาไลแอคทีฟจากเถ้าลอยแคลเซียมสูง โดยเถ้าลอยแคลเซียมสูงถูกแทนที่ด้วยเฟจีดีอีปซั่มร้อยละ 5 และแคลเซียมซัลเฟตร้อยละ 2.5 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ปริมาณการแทนที่ของเฟจีดีอีปซั่มและแคลเซียมซัลเฟตที่เลือกใช้ในการศึกษาครั้งนี้เป็นปริมาณการแทนที่จากการศึกษาในงานวิจัยก่อนหน้านี้ทำให้ได้ค่าการหดตัวของวัสดุอัลคาไลแอคทีฟจากเถ้าลอยแคลเซียมสูงมีค่าต่ำที่สุด สารละลายโซเดียมซิลิเกตและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 10 โมลาร์ เป็นสารละลายต่างในส่วนผสม ผลการทดสอบ พบว่าการแทนที่ด้วยเฟจีดีอีปซั่ม และแคลเซียมซัลเฟตในเถ้าลอย ส่งผลต่อสมบัติของวัสดุอัลคาไลแอคทีฟจากเถ้าลอยแคลเซียมสูง โดยการแทนที่ด้วยเฟจีดีอีปซั่มและแคลเซียมซัลเฟตในเถ้าลอยส่งผลทำให้ค่าระยะเวลาการก่อตัวลดลง แต่อย่างไรก็ตามยังช่วยพัฒนาค่ากำลังรับแรงอัดของวัสดุอัลคาไลแอคทีฟจากเถ้าลอยแคลเซียมสูงที่อายุปลายในกรณีที่มีการแทนที่ด้วยแคลเซียมซัลเฟตมีค่าลดลง สำหรับการใช้เฟจีดีอีปซั่มและแคลเซียมซัลเฟตในวัสดุอัลคาไลแอคทีฟจากเถ้าลอยแคลเซียมสูงส่งผลทำให้ค่าการหดตัวแห้งลดลงเมื่อเทียบกับส่วนผสมควบคุม

คำสำคัญ: วัสดุอัลคาไลจากเถ้าลอยแคลเซียมสูง, เฟจีดีอีปซั่ม, แคลเซียมซัลเฟต, สมบัติเชิงกล, การหดตัวแห้ง

Abstract

This research presents the comparative study using FGD gypsum (FGD) and calcium sulfate (CaSO₄) on mechanical properties and drying shrinkage of alkali-activated high-calcium fly ash (FA) mortar. FA was replaced by FGD and Ca₂SO₄ at the

rates of 5.0% and 2.5% by weight of binder, respectively. This ratio of FGD and Ca₂SO₄ was based on the previous study in term of low drying shrinkage of alkali-activated high-calcium FA paste. Sodium silicate (Na₂SiO₃) solution and 10M sodium hydroxide (NaOH) solution were used as liquid alkaline activation in all mixtures. Test results found that the use of FGD and Ca₂SO₄ to replace FA resulted in decreasing of setting time whereas its strength development improved. However, at the later stage, the compressive and flexural strengths of alkali-activated high-calcium FA with Ca₂SO₄ decreased. The use of FGD and Ca₂SO₄ in alkali-activated high-calcium FA mortar decreased its drying shrinkage, in which comparison with the control mix.

Keywords: Alkali-activated high-calcium fly ash, FGD-gypsum, Calcium sulfate, Mechanical properties, Drying shrinkage

1. คำนำ

ในประเทศไทยมีการศึกษาและพัฒนาวัสดุอัลคาไลจากเถ้าลอยในประเด็นต่าง ๆ เพื่อให้สามารถทราบพฤติกรรมของวัสดุดังกล่าว และหาแนวทางในการประยุกต์ใช้วัสดุดังกล่าวในงานก่อสร้างจริง ข้อดีของวัสดุอัลคาไล คือ การพัฒนาค่ากำลังรับแรงอัด ความสามารถในการทนทานต่อการกัดกร่อนของกรดและด่าง และทนไฟได้ดี [1] อย่างไรก็ตามการนำวัสดุอัลคาไลไปใช้ในหน้างานจริงในภาคสนามยังมีประเด็นที่ควรพิจารณาในเรื่องของการเร่งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของซีเมนต์ ซึ่งการเติมสารผสมเพิ่มในวัสดุอัลคาไลจากเถ้าลอย เช่น วัสดุที่มีองค์ประกอบของแคลเซียมออกไซด์ สามารถช่วยเร่งปฏิกิริยาได้ [2-3] เนื่องจากแคลเซียมออกไซด์ในระบบของวัสดุอัลคาไลทำให้เกิดผลผลิตไฮดรอกไซด์ คือ สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์ (CSH) แทรกอยู่ในเนื้อสารประกอบ

โซเดียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮดรอกไซด์ (NASH) หรือจีโอโพลิเมอร์เจล ทำให้สามารถปรับปรุงสมบัติของวัสดุอัลคาไลให้ดีขึ้น [4] แต่อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาปัจจัยของค่าการหดตัวของวัสดุอัลคาไล พบว่า ค่าการหดตัวแห้งยังคงมีค่าที่ค่อนข้างสูงมากโดยเฉพาะเมื่อบ่มที่อุณหภูมิห้อง [5-6] จากงานวิจัยของ Ridtirud et al. [5] และ Fernandez-Jimenez et al. [7] พบว่า การเร่งปฏิกิริยาด้วยความร้อนช่วยลดค่าการหดตัวแห้งของวัสดุอัลคาไลได้เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับบ่มที่อุณหภูมิห้อง นอกจากนี้ Matakah et al. [8] ได้มีการศึกษาการใช้วัสดุบางชนิด เช่น ซิลิกาฟูมร้อยละ 5 โพลีเอทิลีนไกลคอลร้อยละ 5 ผงหินปูนร้อยละ 5 พบว่าการใช้วัสดุดังกล่าวในวัสดุอัลคาไลช่วยปรับปรุงสมบัติการหดตัวได้

ขณะเดียวกัน สกวรรณ และคณะ [9] ดำเนินการศึกษาเบื้องต้นพบว่า การใช้สารผสมเพิ่มที่มีสมบัติขยายตัวทั้ง 4 ชนิด ประกอบด้วย แคลเซียมซัลเฟต เอพิจีตียิปซัม โดโลไมต์ และแมกนีเซียมคาร์บอเนต ส่งผลต่อสมบัติของวัสดุอัลคาไลเพสต์จากเถ้าลอยแคลเซียมสูง ซึ่งค่าระยะเวลาก่อตัวมีแนวโน้มลดลงส่วนค่ากำลังอัดของวัสดุอัลคาไลเพสต์จากเถ้าลอยแคลเซียมสูงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามประเด็นของการหดตัวค่าการหดตัวแห้งของวัสดุอัลคาไลจากเถ้าลอยแคลเซียมสูงด้วยสารผสมเพิ่มที่มีสมบัติขยายตัวยังไม่ได้มีการรายงานและนำเสนอซึ่งเป็นข้อมูลที่สำคัญและเป็นประโยชน์ต่อการพิจารณาการนำวัสดุอัลคาไลไปใช้ในหน่วยงานจริงในภาคสนาม ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาเปรียบเทียบการใช้เอพิจีตียิปซัมและแคลเซียมซัลเฟตแทนที่ในเถ้าลอยแคลเซียมสูงเพื่อผลิตวัสดุอัลคาไลมอร์ตาร์ที่มีต่อระยะเวลาการก่อตัว กำลังอัด กำลังดัด และการหดตัวแห้ง ซึ่งข้อมูลที่ได้รับจากการศึกษานี้จะเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาวัสดุอัลคาไลใช้ในอุตสาหกรรมก่อสร้างต่อไป

2. การเตรียมวัสดุและการทดลอง

2.1 วัสดุอัลคาไลมอร์ตาร์

วัสดุตั้งต้นที่ใช้ในการผลิตวัสดุอัลคาไลมอร์ตาร์ ประกอบด้วย เถ้าลอยแคลเซียมสูง (FA) จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง สารผสมเพิ่ม ประกอบด้วย เอพิจีตียิปซัม (Flue Gas Desulfurization Gypsum; FGD) แคลเซียมซัลเฟต ($\text{CaSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, CaSO_4) และทรายแม่น้ำ องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุตั้งต้นดังแสดงในตารางที่ 1 สารละลายต่างที่ใช้ในงานวิจัยประกอบด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NH) เข้มข้นเท่ากับ 10 โมลาร์ และสารละลายโซเดียมซิลิเกต (NS) โดยองค์ประกอบทางเคมีของสารละลายโซเดียมซิลิเกต (NS) ประกอบด้วย 13.45% Na_2O , 32.39% SiO_2 และ 54.16% H_2O

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุตั้งต้น

Chemical compositions (%)	FA	FGD	CaSO_4
SiO_2	36.93	0.73	-
Al_2O_3	18.10	0.42	0.06
Fe_2O_3	11.91	0.09	-
CaO	21.41	32.84	40.66
MgO	2.78	0.76	0.30
K_2O	2.28	0.01	0.01
Na_2O	1.42	0.17	0.15
TiO_2	0.36	0.03	0.27
P_2O_5	0.20	0.04	0.02
other	0.16	0.01	0.13
SO_3	2.90	48.47	58.40
LOI	1.54	16.44	-

2.2 อัตราส่วนผสมของวัสดุอัลคาไลมอร์ตาร์

ปริมาณการแทนที่เอพิจีตียิปซัมร้อยละ 5 และแคลเซียมซัลเฟตร้อยละ 2.5 ในเถ้าลอยแคลเซียมสูงเพื่อผลิตวัสดุอัลคาไลมอร์ตาร์เลือกจากงานวิจัยที่ผ่านมา [9] เนื่องด้วยปริมาณการแทนที่ดังกล่าวส่งผลทำให้ได้ค่ากำลังรับแรงอัดและค่าหดตัวแห้งของวัสดุอัลคาไลเพสต์จากเถ้าลอยแคลเซียมสูงผสมสารผสมเพิ่มที่มีสมบัติการขยายตัวดีที่สุด

ในการผลิตวัสดุอัลคาไลมอร์ตาร์จะใช้อัตราส่วนสารละลายโซเดียม-ซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1.0 และอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 2.75 ทุกอัตราส่วนผสม ซึ่งจากการทดสอบความสามารถทำงานได้ของวัสดุอัลคาไลมอร์ตาร์จากเถ้าลอยแคลเซียมสูงผสมเอพิจีตียิปซัมและแคลเซียมซัลเฟตเพื่อให้ได้ค่าการไหลแผ่ตามมาตรฐาน ASTM C1437 (ร้อยละ 110 ± 5) [10] จากกระบวนการทดสอบดังกล่าวจะได้ค่าอัตราส่วนสารละลายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.86 โดยอัตราส่วนผสมของวัสดุอัลคาไลมอร์ตาร์ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 อัตราส่วนผสมของวัสดุอัลคาไลมอร์ตาร์

Symbol	FA (g)	FGD (g)	CaSO_4 (g)	NH (g)	NS (g)	Sand (g)
100FA	100	-	-	43	43	275
FA5.0FGD	95	5	-	43	43	275
FA2.5 CaSO_4	97.5	-	2.5	43	43	275

สำหรับการผสมเริ่มต้นด้วยผสมวัสดุตั้งต้นตามตารางที่ 2 ให้เข้ากันเป็นเวลาประมาณ 1 นาที จากนั้นเติมของเหลวที่เตรียมไว้ (สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลายโซเดียมซิลิเกต) ลงไปในส่วนผสม เดิม ทราย แล้วผสมต่อจนส่วนผสมเป็นเนื้อเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 1



(ก) เครื่องผสม



(ข) ผสมเถ้าลอยและสารผสมเพิ่ม



(ค) เติมน้ำละลายยาค่าง



(ง) เติมน้ำทราย และผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน

รูปที่ 1 วิธีการผสมวัสดุอัลคาไลมอร์ตาร์

2.3 การทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของวัสดุอัลคาไลมอร์ตาร์กำลังอัด กำลังคัด และค่าการหดตัวแห้ง

การทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของวัสดุอัลคาไลมอร์ตาร์ดัดแปลงจากมาตรฐาน ASTM C191 [11] ส่วนการทดสอบค่ากำลังอัดของวัสดุอัลคาไลมอร์ตาร์ดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM C109 [12] โดยใช้แบบหล่อขนาด 50x50x50 มิลลิเมตร และการทดสอบค่ากำลังคัดของวัสดุอัลคาไลมอร์ตาร์ดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM C78 [13] โดยใช้แบบหล่อขนาด 40x40x160 มิลลิเมตร สำหรับการเตรียมตัวอย่างสำหรับทดสอบกำลังอัดและกำลังคัด หลังกระบวนการผสมดำเนินการเทวัสดุอัลคาไลมอร์ตาร์ลงแบบหล่อ หลังจากนั้นกระทุ้งตามมาตรฐานและใช้เกรียงปาดหน้าตัวอย่างให้เรียบและหุ้มแบบหล่อด้วยฟิล์มพลาสติกเพื่อป้องกันการสูญเสียน้ำ ความชื้นของตัวอย่างเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบ 24 ชั่วโมง ดำเนินการถอดแบบหล่อและห่อฟิล์มพลาสติกอีกครั้งและเก็บรักษาตัวอย่างไว้ในห้องอุณหภูมิห้องจนครบอายุการทดสอบเท่ากับ 28 และ 90 วัน โดยการรายงานผลการทดสอบค่ากำลังอัดและกำลังคัดของวัสดุอัลคาไลมอร์ตาร์ใช้ค่าเฉลี่ยจากตัวอย่างจำนวน 3 ตัวอย่าง

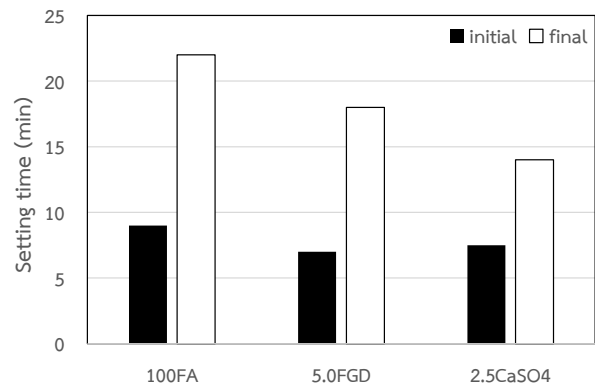
สำหรับการทดสอบการหดตัวแห้งของวัสดุอัลคาไลมอร์ตาร์ใช้แบบหล่อรูปปริซึมขนาด 25x25x285 มิลลิเมตร ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C490 [14] และ ASTM C596 [15] สำหรับการเตรียมตัวอย่างหลังกระบวนการผสมดำเนินการเทวัสดุอัลคาไลมอร์ตาร์ลงแบบหล่อที่เตรียมไว้ หลังจากนั้นกระทุ้งและใช้เกรียงปาดหน้าตัวอย่างให้เรียบและหุ้มแบบหล่อด้วยฟิล์มพลาสติกเพื่อป้องกันการสูญเสียน้ำ ความชื้นของตัวอย่างเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบ 24 ชั่วโมง ดำเนินการถอดแบบหล่อและตัวอย่างจะถูกเก็บไว้ในห้องที่มีการควบคุมอุณหภูมิ 25±1 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ 50±5% โดยดำเนินการวัดค่าการหดตัวแห้งของวัสดุอัลคาไลมอร์ตาร์ที่อายุตัวอย่างเท่ากับ 1-14, 28, 30, 60 และ 90 วัน

โดยแต่ละส่วนผสมใช้ตัวอย่างจำนวน 4 ตัวอย่าง สำหรับวัดค่าการหดตัวแห้ง

3. ผลการวิจัย

3.1 ระยะเวลาการก่อตัว

ระยะเวลาการก่อตัวของวัสดุอัลคาไลมอร์ตาร์จากเถ้าลอยแคลเซียมสูงเมื่อแทนที่ด้วยเอพิจิตีปีซิมร้อยละ 5 และแคลเซียมซัลเฟตร้อยละ 2.5 ดังแสดงในรูปที่ 1

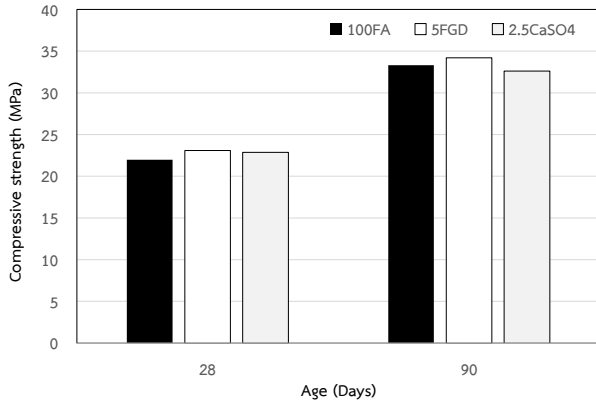


รูปที่ 1 ระยะเวลาการก่อตัวของวัสดุอัลคาไลจากเถ้าลอยแคลเซียมสูงเมื่อแทนที่ด้วยเอพิจิตีปีซิมและแคลเซียมซัลเฟต

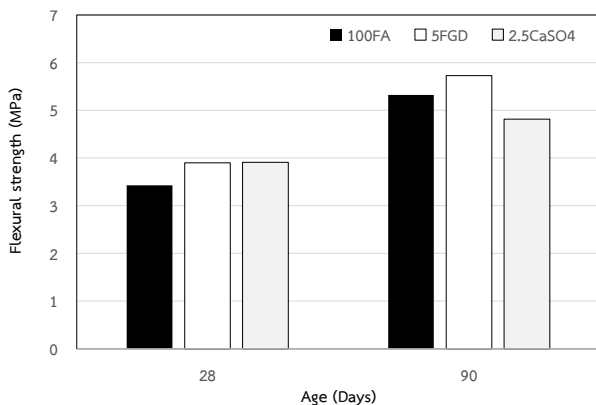
จากรูปที่ 1 พบว่าระยะเวลาการก่อตัวต้นและก่อตัวปลายของวัสดุอัลคาไลมอร์ตาร์จากเถ้าลอยแคลเซียมสูง (ส่วนผสมควบคุม) มีค่าเท่ากับ 9 และ 22 นาที ตามลำดับ เมื่อมีการแทนที่ด้วยเอพิจิตีปีซิม และแคลเซียมซัลเฟตในเถ้าลอยพบว่า ระยะเวลาการก่อตัวต้นและก่อตัวปลายมีแนวโน้มลดลง โดยค่าระยะเวลาการก่อตัวต้นของ 2.5CaSO₄ และ 5FGD มีค่าเท่ากับ 7 และ 7.5 นาที ตามลำดับ และระยะเวลาการก่อตัวปลายมีค่าเท่ากับ 18 และ 14 นาที ตามลำดับ การที่ค่าระยะเวลาการก่อตัวของวัสดุอัลคาไลมอร์ตาร์มีแนวโน้มลดลง เนื่องจากการทำปฏิกิริยาระหว่าง Ca²⁺ จากเอพิจิตีปีซิม แคลเซียมซัลเฟต และเถ้าลอยแคลเซียมสูง กับซิลิกาและอะลูมินาจากวัสดุตั้งต้น เกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์ (CSH) เพิ่มขึ้นในระบบ [3,16] เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างการใช้อเอพิจิตีปีซิมกับแคลเซียมซัลเฟตต่อระยะเวลาการก่อตัวของวัสดุอัลคาไลมอร์ตาร์ พบว่าแคลเซียมซัลเฟตมีแนวโน้มก่อตัวเร็วกว่าการใช้อเอพิจิตีปีซิม อาจเป็นเพราะว่า แคลเซียมซัลเฟตที่ใช้ในการศึกษานี้เป็นแคลเซียมซัลเฟตเกรดห้องปฏิบัติการ ส่งผลให้มีความบริสุทธิ์มากกว่าเอพิจิตีปีซิม จากผลการทดสอบพบว่า วัสดุอัลคาไลที่มีการแทนที่ด้วยวัสดุผสมเพิ่มให้ค่าระยะเวลาการก่อตัวที่รวดเร็วซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับงานซ่อมแซมตามมาตรฐาน ASTM C881/881M-14 [17]

3.2 กำลังอัดและกำลังดัด

กำลังอัดของวัสดุอัลคาไลมอร์ตาร์จากเถ้าลอยแคลเซียมสูงเมื่อแทนที่ด้วยเพฟิซีทีอีพีซีเอ็มร้อยละ 5 และแคลเซียมซัลเฟตร้อยละ 2.5 ดังแสดงในรูปที่ 2 และ 3



รูปที่ 2 กำลังอัดของวัสดุอัลคาไลมอร์ตาร์จากเถ้าลอยแคลเซียมสูงผสมเพฟิซีทีอีพีซีเอ็มและแคลเซียมซัลเฟต



รูปที่ 3 กำลังดัดของวัสดุอัลคาไลมอร์ตาร์จากเถ้าลอยแคลเซียมสูงผสมเพฟิซีทีอีพีซีเอ็มและแคลเซียมซัลเฟต

จากรูปที่ 2 พบว่า ค่ากำลังอัดของวัสดุอัลคาไลมอร์ตาร์จากเถ้าลอยแคลเซียมสูง (ส่วนผสมควบคุม) ที่อายุการบ่มเท่ากับ 28 และ 90 วัน มีค่าเท่ากับ 22.0 และ 33.3 เมกะปาสคาล เมื่อมีการแทนที่ด้วยเพฟิซีทีอีพีซีเอ็มและแคลเซียมซัลเฟตในเถ้าลอยแคลเซียมสูง พบว่า ค่ากำลังอัดของวัสดุอัลคาไลมอร์ตาร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยที่อายุการบ่มเท่ากับ 28 วัน โดยการแทนที่ด้วยเพฟิซีทีอีพีซีเอ็มร้อยละ 5 และแคลเซียมซัลเฟตร้อยละ 2.5 มีค่าเท่ากับ 23.1 และ 22.9 เมกะปาสคาล ตามลำดับ ส่วนค่ากำลังอัดของวัสดุอัลคาไลมอร์ตาร์จากเถ้าลอยแคลเซียมสูงผสมเพฟิซีทีอีพีซีเอ็มร้อยละ 5 ที่อายุการบ่มเท่ากับ 90 วัน มีค่าเท่ากับ 34.2 เมกะปาสคาล แต่อย่างไรก็ตามค่ากำลังอัดของวัสดุอัลคาไลมอร์ตาร์จากเถ้าลอยแคลเซียมสูงผสมแคลเซียมซัลเฟตร้อยละ 2.5 ที่อายุการบ่มเท่ากับ 90 วัน มีแนวโน้มลดลงเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับส่วนผสมควบคุม

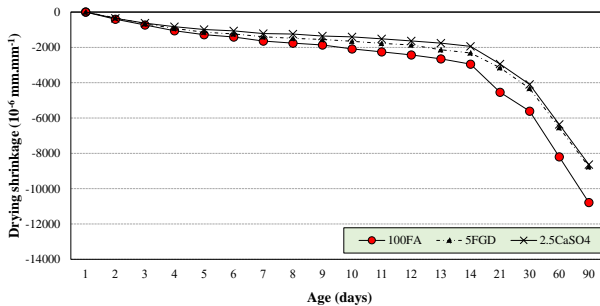
เมื่อวิเคราะห์ผลการทดสอบ พบว่า ค่ากำลังอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อมีการแทนที่ด้วยเพฟิซีทีอีพีซีเอ็มและแคลเซียมซัลเฟตอาจเนื่องจากแคลเซียมออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นสามารถเกิดปฏิกิริยากับซิลิกาและอะลูมินาทำให้เกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมซิลิเกต (CSH) และ/หรือแคลเซียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮดรต (CASH) เพิ่มขึ้น และเป็นการเร่งของปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันภายในระบบ [18-25] แต่อย่างไรก็ตามความเป็นไปได้ที่การใช้แคลเซียมซัลเฟตแทนที่เถ้าลอยแคลเซียมสูงทำให้ค่ากำลังอัดมีแนวโน้มลดลงอาจเนื่องจากปริมาณซัลเฟต (SO₃) ในระบบ ซึ่งส่งผลเชิงลบต่อการพัฒนา กำลังอัดของวัสดุอัลคาไลมอร์ตาร์ เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับระหว่างการใช้เพฟิซีทีอีพีซีเอ็มกับแคลเซียมซัลเฟตต่อกำลังอัดของวัสดุอัลคาไลมอร์ตาร์ พบว่า แคลเซียมซัลเฟตเกรดห้องปฏิบัติการจะส่งผลต่อกำลังอัดมากกว่าเพฟิซีทีอีพีซีเอ็ม

ส่วนผลการทดสอบกำลังดัดของวัสดุอัลคาไลมอร์ตาร์ดังแสดงในรูปที่ 3 พบว่า ค่ากำลังดัดของวัสดุอัลคาไลมอร์ตาร์จากเถ้าลอยแคลเซียมสูง (ส่วนผสมควบคุม) ที่อายุการบ่มเท่ากับ 28 และ 90 วัน มีค่าเท่ากับ 3.4 และ 5.3 เมกะปาสคาล เมื่อเถ้าลอยแคลเซียมสูงถูกแทนที่ด้วยเพฟิซีทีอีพีซีเอ็ม พบว่า การแทนที่เพฟิซีทีอีพีซีเอ็มช่วยปรับปรุงกำลังดัดของวัสดุอัลคาไลมอร์ตาร์ โดยค่ากำลังดัดของวัสดุอัลคาไลมอร์ตาร์ผสมเพฟิซีทีอีพีซีเอ็มมีค่าเท่ากับ 3.9 และ 5.7 เมกะปาสคาล ตามลำดับ ส่วนการแทนที่แคลเซียมซัลเฟตในเถ้าลอยแคลเซียมสูง พบว่า ค่ากำลังรับแรงดัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ที่อายุเท่ากับ 28 วัน และมีแนวโน้มลดลงเมื่ออายุการบ่มเท่ากับ 90 วัน โดยค่ากำลังดัดของวัสดุอัลคาไลมอร์ตาร์ผสมแคลเซียมซัลเฟตมีค่าเท่ากับ 3.9 และ 4.8 เมกะปาสคาล ตามลำดับ ซึ่งผลของกำลังดัดมีแนวโน้มไปในทางเดียวกันกับผลการทดสอบกำลังอัดของวัสดุอัลคาไลมอร์ตาร์

3.3 การหดตัวแห้ง

ค่าการหดตัวแห้งของวัสดุอัลคาไลมอร์ตาร์จากเถ้าลอยแคลเซียมสูงเมื่อแทนที่ด้วยเพฟิซีทีอีพีซีเอ็มร้อยละ 5 และแคลเซียมซัลเฟตร้อยละ 2.5 ดังแสดงในรูปที่ 4 พบว่า ค่าการหดตัวแห้งของวัสดุอัลคาไลมอร์ตาร์จากเถ้าลอยแคลเซียมสูงแทนที่ด้วยเพฟิซีทีอีพีซีเอ็มและแคลเซียมซัลเฟตมีแนวโน้มต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีการใช้เถ้าลอยล้วน (ส่วนผสมควบคุม) อาจเนื่องจากเพฟิซีทีอีพีซีเอ็มหรือแคลเซียมซัลเฟตทำปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์เกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂) และโซเดียมซัลเฟต (Na₂SO₄) [25] ซึ่งสารประกอบโซเดียมซัลเฟตจะมีความสามารถในการขยายตัว จึงช่วยปรับปรุงสมบัติด้านการหดตัวแห้งของวัสดุอัลคาไลมอร์ตาร์ได้ นอกจากนั้น Ettringite จากระบบของวัสดุอัลคาไลยังช่วยปรับปรุงสมบัติด้านการหดตัวแห้งได้ [25] โดยค่าการหดตัวแห้งที่อายุ 90 วัน ของวัสดุอัลคาไลมอร์ตาร์จากเถ้าลอยแคลเซียมสูงจะมีค่าประมาณ 10,784×10⁻⁶ มิลลิเมตรต่อมิลลิเมตร ขณะที่การใช้เพฟิซีทีอีพีซีเอ็มร้อยละ 5.0 ช่วยลดค่าการหดตัวแห้งของวัสดุอัลคาไลมอร์ตาร์เหลือเท่ากับ 8,758×10⁻⁶ มิลลิเมตรต่อมิลลิเมตร และการใช้แคลเซียมซัลเฟต

ร้อยละ 2.5 ช่วยลดค่าการหดตัวของวัสดุอัลคาไลอมอร์ทัลที่เหลือเท่ากับ $8,633 \times 10^{-6}$ มิลลิเมตรต่อมิลลิเมตร



รูปที่ 4 ค่าการหดตัวของวัสดุอัลคาไลอมอร์ทัลจากเถ้าลอยแคลเซียมสูงผสมเอฟจีดีซีพีซีเอ็มและแคลเซียมซัลเฟต

4. บทสรุป

การใช้สารผสมเพิ่มที่มีสมบัติขยายตัว ได้แก่ เอฟจีดีซีพีซีเอ็มและแคลเซียมซัลเฟตแทนที่ในเถ้าลอยแคลเซียมสูงเพื่อผลิตวัสดุอัลคาไลอมอร์ทัลได้ผลการศึกษา คือ

1. ระยะเวลาการก่อตัวของวัสดุอัลคาไลอมอร์ทัลเมื่อมีการแทนที่เอฟจีดีซีพีซีเอ็มและแคลเซียมซัลเฟตแทนที่ในเถ้าลอยแคลเซียมสูงมีแนวโน้มลดลงเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบส่วนผสมควบคุม (ไม่มีการแทนที่ด้วยวัสดุผสมเพิ่ม)

2. การใช้เอฟจีดีซีพีซีเอ็มร้อยละ 5.0 แทนที่เถ้าลอยแคลเซียมสูงช่วยปรับปรุงกำลังอัดและกำลังดัดได้ ส่วนการใช้แคลเซียมซัลเฟตร้อยละ 2.5 แทนที่เถ้าลอยแคลเซียมสูงมีแนวโน้มเชิงลบต่อการพัฒนา กำลังอัดและกำลังดัดของวัสดุอัลคาไลอมอร์ทัลที่อายุการบ่มเท่ากับ 90 วัน

3. การใช้เอฟจีดีซีพีซีเอ็มและแคลเซียมซัลเฟตแทนที่ในเถ้าลอยแคลเซียมสูงช่วยปรับปรุงสมบัติด้านการหดตัวของวัสดุอัลคาไลอมอร์ทัล

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษาและสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย สัญญาเลขที่ MRG6180161 และผู้วิจัยขอขอบพระคุณสาขาวิชาเทคโนโลยีโยธา คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี และหน่วยวิจัยเทคโนโลยีวัสดุก่อสร้างอย่างยั่งยืน สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ ศูนย์กลางมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่อนุเคราะห์วัสดุและเครื่องมือในการดำเนินงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

[1] Davidovits, J. (1991). Geopolymers - Inorganic polymeric new materials. *Journal of Thermal Analysis*, 37(8), pp. 1633-1656.

- [2] Allahverdi, A., Kani, E.N. and Yazdanipour, M. (2011). Effects of blast-furnace slag on natural pozzolan-based geopolymer cement. *Ceramics-Silikaty*, 55(1), pp. 68-78.
- [3] Guo, X., Shi, H., Chen, L. and Dick, W. (2010). Alkali-activated complex binders from class C fly ash and Ca-containing admixtures. *Journal of Hazardous Materials*, 173(1-3), pp. 480-486.
- [4] Garcia-Lodeiro, I., Palomo, A., Fernandez-Jimenez, A. and MacPhee DE. (2011). Compatibility studies between N-A-S-H and C-A-S-H gels. Study in the ternary diagram $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$. *Cement and Concrete Research*, 41(9), pp. 923-931.
- [5] Ridditirud, C., Chindaprasirt, P., Pimraksa, K. (2011). Factors affecting the shrinkage of fly ash geopolymers. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, 18(1), pp. 100-104.
- [6] Punurai, W., Kroehong, W., Saptamongkol, A., Chindaprasirt, P. (2018). Mechanical properties, microstructure and drying shrinkage of hybrid fly ash-basalt fiber geopolymer paste. *Construction and Building Materials*, 186, pp. 62-70.
- [7] Fernández-Jiménez, A., Palomo, A. and Criado, M. (2005). Microstructure development of alkali-activated fly ash cement: a descriptive model. *Cement and Concrete Research*, 35(6), pp. 1204-1209.
- [8] Matakah, F., Salem, T., Shaafaey, M. and Soroushian, P. (2019). Drying shrinkage of alkali activated binders cured at room temperature. *Construction and Building Materials*, 201, pp. 563-570.
- [9] สกวรรณ ทานจิตสุวรรณ, บวรรัก อินทร์จ้อหอ, ญัฐวัฒน์ เสาะสูงเนิน, ธนิตร์ เสาะสูงเนิน, ภัทรพล จักรวรรณ, อัครพล วัชชุม, นัฏฐริกา เพ็งพิมาย และธนากร ภูเงินชา (2563). ผลของสารผสมเพิ่มที่ขยายตัวต่อระยะเวลาก่อตัวและกำลังรับแรงอัดของวัสดุอัลคาไลจากเถ้าลอยแคลเซียมสูง. *การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 15*, 25-27 มีนาคม 2563, หน้า 216-220.
- [10] ASTM C1437. (2015). Standard test method for flow of hydraulic cement mortar. *Annual Book of ASTM Standard*. Vol.04.01.
- [11] ASTM C191. (2002). Standard test method for time of setting of hydraulic cement by Vicat needle. *Annual Book of ASTM Standard*. Vol.04.01.
- [12] ASTM C109. (2002). Standard test method of compressive strength of hydraulic cement mortars. *Annual Book of ASTM Standard*. Vol.04.01.

- [13] ASTM C78. (2018). Standard test method for flexural strength of concrete. *Annual Book of ASTM Standard*. Vol.04.01.
- [14] ASTM C490. (2017). Standard practice for use of apparatus for the determination of length change of hardened cement paste, mortar, and concrete. *Annual Book of ASTM Standard*. Vol.04.01.
- [15] ASTM C596. (2018). Standard test method for drying shrinkage of mortar containing hydraulic cement. *Annual Book of ASTM Standard*. Vol.04.01.
- [16] กนกวรรณ ปันเขต และอุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์ (2553). ผลของสารผสมเพิ่มต่อสมบัติของจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอย. *วารสารวิจัยและพัฒนา มจร*. ปีที่ 33, ฉบับที่ 2, หน้า 121-132.
- [17] ASTM C881/C881M-14. (2014). Standard specification for epoxy-resin-base bonding systems for concrete. *Annual Book of ASTM Standard*. Vol.04.02.
- [18] Pangdaeng, S. , Phoo- ngerkham, T. , Sata, V. and Chindapasirt, 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.
- [19] Hanjitsuwan, S. , Phoo- ngerkham, T. and Damrongwiriyanupap, N. (2017). Comparative study using Portland cement and calcium carbide residue as a promoter in bottom ash geopolymer mortar. *Construction and Building Materials*, 133, pp. 128-134.
- [20] Phoo- ngerkham, T. , Phiangphimai, C. , Intarabut, D. , Hanjitsuwan, S., Damrongwiriyanupap, N. And Li, L.Y. (2020). Low cost and sustainable repair material made from alkali-activated high-calcium fly ash with calcium carbide residue. *Construction and Building Materials*, 247, pp. 118543.
- [21] Phoo-ngerkham, T., Chindapasirt, P., Sata, V., Pangdaeng, S. and Sinsiri, T. (2013). Properteis of high calcium fly ash geopolymer pastes containing Portland cement as additive. *International Journal of Minerals, metallurgy and Materials*, 20(2), pp. 214-220.
- [22] Phoo-ngerkham, T., Hanjitsuwan, S., Damrongwiriyanupap, N. and Chindapasirt, P. (2017). Effect of sodium hydroxide and sodium silicate solutions on strengths of alkali activated high calcium fly ash containing Portland cement. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 21(6), pp. 2202-2010.
- [23] Phoo-ngerkham, T., Maegawa, A., Mishima, N., Hatanaka, S. and Chindapasirt, P. (2015). Effects of sodium hydroxide and sodium silicate solutions on compressive and shear bond strengths of FA-GBFS geopolymer. *Construction and Building Materials*, 91, pp. 1-8.
- [24] Phoo-ngerkham, T., Sata, V., Hanjitsuwan, S., Ridtirud, C., Hatanaka, S. and Chindapasirt, P. (2016). Compressive strength, bending and fracture characteristics of high calcium fly ash geopolymer mortar containing Portland cement cured at ambient temperature. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 41(4), pp. 1263-71.
- [25] Boonserm, K., Sata, V., Pimraksa, K. and Chindapasirt, P. (2012). Improved geopolymerization of bottom ash by incorporating fly ash using waste gypsum as additive. *Cement & Concrete Composites*, 34, pp. 819-824.
- [26] Chindapasirt, P., Thaiwitcharoen, S., Kawprion, S. and Rattanasak, U. (2013). Controlling ettringite formation in FBC fly ash geopolymer concrete. *Cement and Concrete Composites*, 41, pp. 24-28.