http://journal.rmutp.ac.th/

กำลังและความต้านทานการกัดกร่อนของมอร์ต้าร์ที่ใช้วัสดุประสานกระตุ้นด้วยด่างจากเถ้าถ่านหินแคลเซียมสูง

อภัย เบ็ญจพงศ์ เซาฟีร์ ดือราแม* และ รัตนศักดิ์ หงษ์ทอง

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
2 ถนนนางลิ้นจี่ แขวงทุ่งมหาเมฆ เขตสาทร กรุงเทพมหานคร 10120

รับบทความ 9 กุมภาพันธ์ 2564 แก้ไขบทความ 26 สิงหาคม 2564 ตอบรับบทความ 16 กันยายน 2564

บทคัดย่อ

งานวิจัยมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาวัสดุประสานกระตุ้นด้วยด่างที่ทำจากเถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงมาเป็นวัสดุประสานเพื่อทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยส่วนผสมของมอร์ต้าร์ที่ทำจากเถ้าถ่านหินใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ในการกระตุ้นกำลังที่มีความเข้มข้น 2, 4, 6 และ 8 โมลาร์ โดยใช้สารลดน้ำพิเศษเพื่อควบคุมการไหลแผ่ของมอร์ต้าร์ให้อยู่ในช่วงร้อยละ 105 – 110 ทำการทดสอบกำลังอัดที่อายุ 7, 28, 45 และ 60 วัน และทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนจากกรดซัลฟิวริกที่มีความเข้มข้นร้อยละ 3 จากการทดสอบพบว่า มอร์ต้าร์ที่ทำจากเถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงและใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 6 โมลาร์เป็นวัสดุประสานสามารถรับกำลังอัดได้สูงสุด ซึ่งสามารถพัฒนากำลังอัดได้ถึง 189 กก/ซม^2 ที่อายุ 60 วัน ส่วนการทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากกรดซัลฟิวริกพบว่า มอร์ต้าร์ที่ใช้เถ้าถ่านหินกระตุ้นด้วยด่างที่มีความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 6 โมลาร์ มีการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการกัดกร่อนของกรดซัลฟิวริกน้อยที่สุด

คำสำคัญ : วัสดุประสานกระตุ้นด้วยด่าง; เถ้าถ่านหินแคลเซียมสูง; กำลังอัด; ความต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากกรด

** ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +668 9732 2534, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: saofee.d@mail.rmutk.ac.th*

http://journal.rmutp.ac.th/

Strength and Acid Resistance of Mortar Made from Alkali Activated High Calcium Fly Ash

Apai Benchapong Saofee Dueramae* and Rattanasak Hongthong

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Krungthep

2 Nanglinchee Road, Tungmahamek, Sathorn, Bangkok, 10120

Received 9 February 2021; Revised 26 August 2021; Accepted 16 September 2021

Abstract

The aim of this study is developed of alkali activated high calcium fly ash to use as cementitious material to replace Portland cement. The mixture of mortar made from fly ash and sodium hydroxide solution (NaOH) was used to activate strength at concentrations of 2, 4, 6 and 8 molars. Superplasticizer was used to control the flow of mortar in the rage of 105 – 110. The compressive strength of mortar was determined at 7, 28, 45 and 60 days. The acid resistance of mortars due to sulfuric at a concentration of 3% were also investigated. The results showed the mortar made from high calcium fly ash with sodium hydroxide of 6 molar obtained the highest compressive strength, which could be developed compressive strength up to 189 ksc at 60 days. For the acid resistance of mortar, it was found that the of use 6 molar of NaOH activated high calcium fly ash binder had the least weight loss due to sulfuric acid attack.

Keywords : Alkali Activated; High Calcium Fly Ash; Compressive Strength; Acid Resistance

** Corresponding Author. Tel.: +668 9732 2534, E-mail Address: saofee.d@mail.rmutk.ac.th*

1. บทนำ

วัสดุประสานที่ทำการกระตุ้นด้วยด่าง (Alkali Activated Binder) คือ วัสดุที่ทำการสังเคราะห์ขึ้นเพื่อนำมาใช้ทดแทนวัสดุซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ใช้กันในปัจจุบัน ซึ่งเป็นโครงสร้างที่ทำหน้าที่ในการเชื่อมประสานประกอบไปด้วยสารตั้งต้นหลักคือ ซิลิกา อลูมินาและแคลเซียม โดยมีสารละลายด่าง ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หรือโพเพสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) [1], [2] ที่หน้าที่กระตุ้นและชะละลายออกไซด์จากวัสดุตั้งต้น ทำปฏิกิริยากันเป็นโครงสร้างของผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในรูปของ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) แคลเซียมอลูมิโนซิลิเกรตไฮเดรต (CASH) และโซเดียมอลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต (NASH) [3] ซึ่งมีหน้าที่ในการเชื่อมประสานคล้าย ๆ ผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรตชันของปูนซีเมนต์

เถ้าถ่านหิน (Fly Ash) เป็นผลพลอยได้จากการเผาถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า เถ้าถ่านหินเป็นวัสดุปอซโซลานชนิดหนึ่งที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายเพื่อลดการใช้ปูนซีเมนต์ โดยองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหิน ประกอบด้วยองค์ประกอบของซิลิกา (SiO_2) อลูมินา (Al_2O_3) เฟอริค (Fe_3O_2) และแคลเซียม (CaO) ซึ่งเป็นองค์ประกอบของสารตั้งต้นของวัสดุประสานกระตุ้นด้วยด่าง การใช้เถ้าถ่านหินมาผลิตเป็นวัสดุประสานกระตุ้นด้วยด่างอาจมีศักยภาพและเป็นแนวทางหนึ่งในการลดปัญหาทางสิ่งแวดล้อมอันเนื่องมาจากการใช้พลังงานในการเผาและการปล่อยก๊าซคอร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) โดยกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์การเผาใช้อุณหภูมิสูงประมาณ 1,400-1,600 องศาเซลเซียส และการผลิตปูนซีเมนต์ 1 ตัน ปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ประมาณ 1 ตันสู่บรรยากาศ [4]

อย่างไรก็ตามการพัฒนาวัสดุประสานกระตุ้นด้วยด่างเพื่อทดแทนปูนซีเมนต์นั้น ขึ้นกับปัจจัยในหลาย ๆ ด้าน หนึ่งในนั้นได้แก่ วัสดุที่ใช้เป็นสารตั้งต้นที่นำมาใช้ในการผลิต เนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุตั้งต้นที่แตกต่างกันส่งผลต่อโครงสร้างของผลิตภัณฑ์ที่ทำหน้าที่ในการเชื่อมประสาน ซึ่งสมบัติในด้านด่าง ๆ ทั้งสมบัติทางกลและด้านความทนทาน เมื่อพิจารณาถึงองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหิน พบว่าเถ้าถ่านหินนั้นมีองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกัน มีทั้งเถ้าถ่านหินประเภทที่มีแคลเซียมในปริมาณสูงและเถ้าถ่านหินที่มีแคลเซียมในปริมาณต่ำ ขึ้นอยู่กับแหล่งที่มา จากการศึกษาที่ผ่านมา พบว่า ปริมาณขององค์ประกอบของสารตั้งต้นที่นำมาผลิตเป็นวัสดุประสานส่งผลต่อสมบัติในด้านด่าง ๆ โดยเฉพาะด้านกำลังจากการศึกษาและนำเสนอของ A. Fernández-Jiménez and A. Palomo [5] พบว่า ปริมาณแคลเซียมในสารตั้งต้น ส่งผลต่อการก่อตัวและการรับกำลังอัด โดยวัสดุประสานกระตุ้นด้วยด่างที่มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ในสารตั้งต้นต่ำนั้น มีระยะเวลาการก่อตัวที่นานและมีการพัฒนากำลังอัดที่ช้าเมื่อบ่มที่อุณหภูมิห้อง นอกจากนั้นความทนทานก็เป็นเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่สำคัญนอกเหนือจากกำลังอัด เพราะในสภาพแวดล้อมทั่วไปพบว่าบ่อยครั้ง มอร์ต้าร์หรือคอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์ถูกทำลายเนื่องจากสารเคมี โดยเฉพาะกรดซัลฟิวริก เนื่องจากปูนซีเมนต์มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) สูง [6] ดังนั้นหากสารตั้งต้นที่ใช้ผลิตเป็นวัสดุประสานกระตุ้นด้วยด่างนั้นมีปริมาณของแคลเซียมที่สูงอาจส่งผลต่อความทนทานของคอนกรีตหรือมอร์ต้าร์เมื่อสัมผัสกับสารละลายกรด

จากปัญหาดังกล่าวจึงเกิดแนวความคิดที่จะทำการศึกษาผลของการใช้เถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงมาเป็นวัสดุประสานกระตุ้นด้วยด่างโดยการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นคือ 2, 4, 6 และ 8 โมลาร์เป็นสารละลายด่างในการกระตุ้นกำลัง โดยศึกษาผลของการพัฒนากำลังอัดและการสูญเสียน้ำหนักอันเนื่องจากการกัดกร่อนของกรดซัลฟิวริกของมอร์ต้าร์ที่ทำจากวัสดุประสานกระตุ้นด้วยด่างที่ใช้เถ้าถ่านหินแคลเซียมสูง

2. ระเบียบวิธีวิจัย

การศึกษานี้เป็นการศึกษา การพัฒนากำลังอัดและการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการกัดกร่อนของกรดซัลฟิวริกของมอร์ต้าร์ที่ทำจากวัสดุประสานกระตุ้นด้วยด่างที่ใช้เถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงโดยมีสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารกระตุ้นกำลังโดยใช้ความเข้มข้น 2, 4, 6 และ 8 โมลาร์

2.1 ขั้นตอนการวิจัย

2.1.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

งานวิจัยนี้ใช้เถ้าถ่านหินที่ได้จากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าแม่เมาะ อ.แม่เมาะ จ.ลำปาง เป็นวัสดุประสานเพื่อผลิตวัสดุประสานกระตุ้นด้วยด่างโดยไม่ใช้ปูนซีเมนต์ โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารละลายด่างสำหรับกระตุ้นกำลัง

2.1.2 ส่วนผสมของมอร์ต้าร์

สำหรับส่วนผสมของมอร์ต้าร์กระตุ้นด้วยด่าง ใช้วัสดุประสานจากเถ้าถ่านหินชนิดที่ได้จากโรงงานโดยตรงและใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ในการกระตุ้นกำลัง โดยมีความเข้มข้น 2, 4, 6 และ 8 โมลาร์ ดังแสดงในตารางที่ 1 มีอัตราส่วนวัสดุประสานต่อมวลรวมละเอียดเท่ากับ 1:2.75 ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.4 และใช้สารลดน้ำพิเศษประเภท F (Superplasticizer Type F) เพื่อควบคุมค่าการไหลแผ่ของมอร์ต้าร์ (flow) ให้อยู่ในช่วงร้อยละ 105 – 115

2.1.3 กำลังอัดของมอร์ต้าร์

การทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าร์ ใช้ตัวอย่างมอร์ต้าร์มาตรฐานที่มีขนาด 5x5x5 ซม^3 ตามมาตรฐาน ASTM C109 [7] ทำการถอดแบบภายหลังการหล่อตัวอย่าง 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปบ่มในน้ำและนำไปทดสอบกำลังอัดที่อายุ 7, 28, 45 และ 60 วัน แต่ละอายุการทดสอบใช้ตัวอย่างมอร์ต้าร์ 3 ตัวอย่างเพื่อหาค่าเฉลี่ย

2.1.4 การต้านทานการกัดกร่อนจากกรดซัลฟิวริก

การทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากกรดซัลฟิวริก ทำการทดสอบโดยใช้ตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่มีขนาด 5x5x5 ซม^3 โดยในแต่ละส่วนผสมใช้จำนวน 3 ตัวอย่างเพื่อนำมาหาค่าเฉลี่ย ทดสอบโดยนำตัวอย่างไปแช่ในสารละลายกรดซัลฟิวริกที่มีความเข้มข้นเท่ากับร้อยละ 3 และทำการวัดค่าการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์หลังจากแช่ในสารละลายกรดเป็นระยะเวลา 1, 3, 7, 14, 28, 42 และ 60 วัน โดยคำนวณหาร้อยละของการสูญเสียน้ำหนักดังแสดงในสมการที่ (1)

$$W_L = \frac{(W_A - W_B)}{W_A} \times 100\ \% \quad (1)$$

โดยที่

W_L = ร้อยละของการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์ (%)

W_A = น้ำหนักของมอร์ต้าร์ก่อนแช่ในสารละลายกรดซัลฟิวริก (g)

W_B = น้ำหนักของมอร์ต้าร์หลังแช่ในสารละลายกรดซัลฟิวริกในแต่ละอายุการทดสอบ (g)

ตารางที่ 1 ส่วนผสมของมอร์ต้าร์

Sample	Mix Proportion by Weight (g)					W/B	Flow (%)
	Fly ash	Sand	NaOH	water	SP*		
2M-HFA	100	275	3.2	39.5	0.8	0.4	109
4M-HFA	100	275	6.3	39.4	1.1	0.4	108
6M-HFA	100	275	9.5	39.4	1.2	0.4	108
8M-HFA	100	275	12.3	38.5	3.1	0,.4	107

หมายเหตุ* SP มีน้ำในส่วนผสมร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

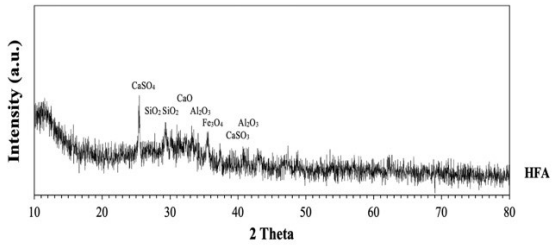
3.1 สมบัติทางเคมีของวัสดุประสานและสมบัติทางสัณฐานวิทยาของวัสดุประสาน

ผลการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหินที่ใช้สำหรับงานวิจัยนี้ ซึ่งทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence (XRF) แสดงดังตารางที่ 2 จากการทดสอบ พบว่า เถ้าถ่านหิน (FA) มีองค์ประกอบหลักทางเคมีเป็นออกไซด์ของธาตุซิลิกา (SiO_2), อลูมินา (Al_2O_3) เหล็ก (Fe_2O_3) และแคลเซียม (CaO) เป็นองค์ประกอบหลัก โดยเถ้าถ่านหินที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีปริมาณผลรวมของออกไซด์หลัก (SiO_2, Al_2O_3 และ Fe_2O_3) รวมกันเท่ากับร้อยละ 56.01 ซึ่งจัดเป็นเถ้าถ่านหิน class C ตามมาตรฐาน ASTM C618 [8] นอกจากนี้ยังพบว่า เถ้าถ่านหินที่ใช้ในงานวิจัยมีปริมาณออกไซด์ของแคลเซียมเท่ากับร้อยละ 29.41 ซึ่งมีค่ามากกว่าร้อยละ 10 ซึ่งจัดเป็นเถ้าถ่านหินแคลเซียมสูง (High-Calcium Fly Ash)

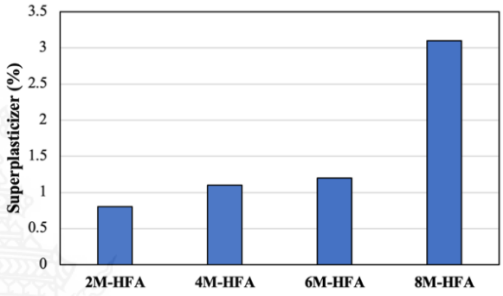
ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน

Oxide (%)	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	SO_3	LOI
Fly ash	24.25	13.43	18.34	29.56	6.46	0.6

รูปที่ 1 แสดงสมบัติทางสัณฐานวิทยาของเถ้าถ่านหินแคลเซียมสูง วิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ด้วยเครื่อง X-Ray Diffraction จากผลการวิเคราะห์ พบว่า เถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงที่ใช้เป็นวัสดุประสานในงานวิจัยนี้ โดยสามารถตรวจจับจุดยอด (peak) ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ซึ่งแสดงถึงส่วนประกอบทางแร่ในรูปแบบต่าง ๆ ของเถ้าถ่านหิน ได้แก่ ควอตซ์ (SiO_2), แคลเซียมออกไซด์ (CaO), อลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3), เฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) และแอนไฮไดรต์ ($CaSO_4$) และสามารถพบสารประกอบที่ไม่เป็นผลึกอยู่ในช่วงระหว่าง 20 – 40° 2θ



รูปที่ 1 XRD ของเถ้าถ่านหินแคลเซียมสูง (High Calcium Fly Ash)



รูปที่ 2 ความต้องการสารลดน้ำของส่วนผสมมอร์ต้าร์ที่ทำจากถ่านหินแคลเซียมสูงกระตุ้นด้วยด่าง

3.2 ความต้องการสารลดน้ำพิเศษในส่วนผสมมอร์ต้าร์จากเถ้าถ่านหินกระตุ้นด้วยด่าง

ผลของปริมาณการใช้สารลดน้ำพิเศษ (Superplasticizer) ของส่วนผสมมอร์ต้าร์ที่ทำจากเถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงกระตุ้นด้วยด่างซึ่งใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกซ์ที่มีความเข้มข้น 2, 4, 6 และ 8 โมลาร์ แสดงไว้ดังรูปที่ 2 โดยแสดงปริมาณสารลดน้ำพิเศษในส่วนผสมเพื่อควบคุมการไหลแผ่ของมอร์ต้าร์ให้อยู่ในช่วงร้อยละ 110 – 115 พบว่า การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกซ์ที่มีความเข้มข้น 2 – 6 โมลาร์ มีปริมาณการใส่สารลดน้ำที่ใกล้เคียงกันที่ค่าร้อยละ 0.8 – 1.2 ในขณะที่ส่วนผสมที่ 8M-HFA ต้องใช้สารลดน้ำมากกว่าที่ร้อยละ 3.1 เพื่อให้ได้อัตราการไหลแผ่ที่กำหนด จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในส่วนผสมของมอร์ต้าร์

ที่มีความเข้มข้นมากขึ้น ส่งผลให้ต้องใช้สารลดน้ำพิเศษในปริมาณมากขึ้น เนื่องจากเมื่อใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นมากขึ้นส่งผลการชะละลายของเถ้าถ่านหินซึ่งเป็นสารตั้งต้นของการทำปฏิกิริยาที่มากขึ้น โดยมอร์ต้าร์ที่ได้จะมีความข้นเหนียวของเนื้อสูงมาก ส่งผลให้ต้องใช้ปริมาณสารลดน้ำในปริมาณมากขึ้น โดยเฉพาะเมื่อสารตั้งต้นมีปริมาณของแคลเซียมออกไซด์ที่สูง สอดคล้องกับงานวิจัยของ N. Makul and B. Chatveera [9]

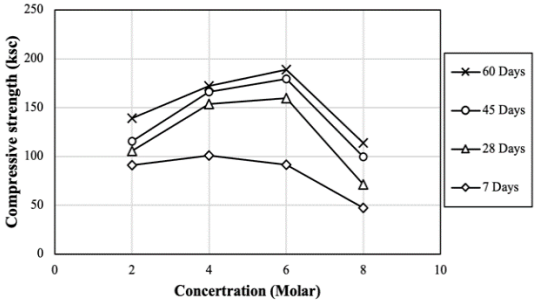
3.3 กำลังอัดของมอร์ต้าร์

ตารางที่ 3 แสดงผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ทำจากเถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงกระตุ้นด้วยด่างที่มีความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 2, 4, 6 และ 8 โมลาร์ จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า การพัฒนากำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ทำจากเถ้าถ่านหินกระตุ้นด้วยด่างมีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่มที่มากขึ้นเช่นเดียวกับมอร์ต้าร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน อย่างไรก็ตามกำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ผลิตขึ้นจากวัสดุประสานกระตุ้นด้วยด่างนั้นมีกระบวนการพัฒนากำลังอัดที่แตกต่างจากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เกิดจากปูนซีเมนต์ โดย E. Gomaa et al. [10] และ F. Winnefeld et al. [11] ได้อธิบายไว้ว่าผลผลิตของวัสดุประสานกระตุ้นด้วยด่าง เกิดจากการชะละลายของวัสดุตั้งต้นโดยสารละลายด่าง ทำให้เกิดการละลายของซิลิกอน อลูมินา และแคลเซียมซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของวัสดุตั้งต้น (เถ้าถ่านหิน) จากนั้นเกิดการรวมตัวกันกลายเป็นโครงสร้างของแคลเซียมอลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต (CASH) และ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ซึ่งทำหน้าที่ในการเชื่อมประสานและสามารถรับกำลังได้คล้ายกับผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน นอกจากนั้น ปริมาณของแคลเซียมที่สูงของสารตั้งต้นทำให้เกิดโครงสร้างของแคลเซียมอลูมิโนซิลิเกตไฮเดรตที่มากขึ้น [12], [13]

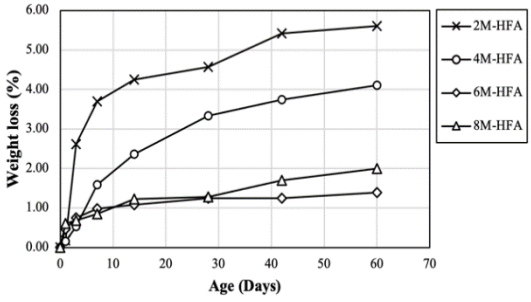
ตารางที่ 3 กำลังอัดของมอร์ต้าร์

Sample	Compressive strength (ksc)			
	7 days	28 days	45 days	60 days
2M-HFA	91	106	116	139
4M-HFA	101	154	166	172
6M-HFA	91	160	179	189
8M-HFA	47	71	100	114

เมื่อพิจารณาผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกด์ไซด์ที่มีต่อเถ้าถ่านหินแคลเซียมสูง พบว่า การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในปริมาณความเข้มข้นที่แตกต่างกันส่งผลต่อการพัฒนากำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ต่างกันซึ่งสังเกตได้ชัดเจนดังแสดงในรูปที่ 3 จากการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้นจาก 2 โมลาร์ ถึง 6 โมลาร์ ส่งผลต่อการพัฒนากำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ทำจากเถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงกระตุ้นด้วยด่างที่เพิ่มสูงขึ้น โดยเฉพาะระหว่างอายุ 28 ถึง 60 วัน อย่างไรก็ตามเมื่อทำการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มากขึ้นถึง 8 โมลาร์กลับพบว่ามอร์ต้าร์มีกำลังรับแรงอัดที่ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ระหว่าง 2 ถึง 6 โมลาร์ เนื่องจากมอร์ต้าร์ 8M-HFA ดังกล่าวอาจมีปริมาณสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในส่วนผสมมากเกินไปทำให้กำลังอัดของมอร์ต้าร์มีค่าลงลด โดยปริมาณโซเดียมโฮดรอกไซด์ที่มากไปอาจทำให้เกิดสารประกอบอลูมิโนซิลิเกตในรูปที่เป็นผลึกมากกว่าในรูปแบบอสัณฐาน [14], [15] จากการผลศึกษาพบว่า มอร์ต้าร์ที่ใช้เถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงที่ได้จากโรงงานโดยตรงเป็นวัสดุประสานและใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 6 โมลาร์ สามารถพัฒนากำลังได้สูงสุด โดยมอร์ต้าร์ 6M-HFA สามารถพัฒนากำลังอัดได้ถึง 189 กก/ซม^2 ที่อายุ 60 วัน โดยสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุประสานได้โดยไม่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และกำลังอัดมอร์ต้าร์



รูปที่ 4 การสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์จากการกัดกร่อนเนื่องจากกรดซัลฟิวริก

3.4 การต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากกรดซัลฟิวริก

ผลการทดสอบการต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากกรดซัลฟิวริกของมอร์ต้าร์ที่ใช้เถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงและกระตุ้นกำลังด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์แสดงไว้ในรูปที่ 4 โดยเปรียบเทียบการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์ซึ่งแช่ในสารละลายกรดซัลฟิวริก จากการทดสอบพบว่า มอร์ต้าร์ 2M-HFA และ 4M-HFA มีแนวโน้มการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการกัดกร่อนเนื่องจากกรดมากกว่า มอร์ต้าร์ 6M-HFA และ 8M-HFA โดยมอร์ต้าร์ 2M-HFA มีค่าการสูญเสียน้ำหนักเท่ากับร้อยละ 5.60 หลังจากแช่เป็นเวลา 56 วัน ส่วนมอร์ต้าร์ 4M-HFA มีค่าการสูญเสียน้ำหนักเท่ากับร้อยละ 4.11 หลังจากแช่เป็นเวลา 56 วัน ในขณะที่มอร์ต้าร์ที่ใช้เถ้าถ่านหินที่มีแคลเซียมสูงและใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์กระตุ้นกำลังที่มีความเข้มขึ้น 6 ถึง 8 โมลาร์ มีค่าการสูญเสียน้ำหนักจากการกัดกร่อนของกรดซัลฟิวริกลดลงอย่างมาก โดยมอร์ต้าร์ 6M-HFA และ 8M-HFA มีค่าการสูญเสียน้ำหนัก หลังจากแช่เป็นเวลา 56 วัน เท่ากับร้อยละ 1.39 และ 0.96 ตามลำดับ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Sindhunata และคณะ [16] พบว่าการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นมากขึ้นส่งผลให้อัตราการชะละลายอิออนของซิลิกาและอลูมินาสูงขึ้นและมีแนวโน้มที่จะเกิดเป็นโครงสร้างของแคลเซียมอลูมิโลซิลิเกตไฮเดรต (CASH) ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลต่อการท้านต้านการกัดกร่อนที่มากขึ้น นอกจากนั้นเมื่อพิจารณาผลของกำลังอัดของมอร์ต้าร์จากรูปที่ 3 และความต้านทานการกัดกร่อนของมอร์ต้าร์ที่ใช้วัสดุประสานกระตุ้นด้วยด่างที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นต่าง ๆ จากรูปที่ 4 ผลการทดสอบพบว่า ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์มีแนวโน้มลดลงตามกำลังอัดที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากมอร์ต้าร์ที่กำลังอัดเพิ่มขึ้น จะมีความแน่นของโครงสร้างของเนื้อซีเมนต์เพสต์ที่มากขึ้น ส่งผลให้มีความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนที่สูงขึ้น [17]

เมื่อเปรียบเทียบผลของความต้านกัดกร่อนเนื่องจากกรดซัลฟิวริกของมอร์ต้าร์ที่ใช้วัสดุประสานกระตุ้นด้วยด่างและมอร์ต้าร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ พบว่ามอร์ต้าร์ที่ใช้วัสดุประสานจากเถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงกระตุ้นด้วยด่างมีค่าการสูญเสียน้ำหนักอยู่ในช่วงร้อยละ 1.39-5.60 ที่ระยะเวลาการแช่กรดซัลฟิวริก 56 วัน ส่วนซีเมนต์มอร์ต้าร์ (OPC) มีค่าการสูญเสีย เท่ากับร้อยละ 46.08 น้ำหนักที่ระยะเวลาการแช่กรดซัลฟิวริก 60 วัน [18] แสดงให้เห็นว่ามอร์ต้าร์ที่ทำจากวัสดุประสานกระตุ้นด้วยด่างมีความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากกรดซัลฟิวริกได้ดีกว่า เนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ทำให้เกิดสารประกอบของ

แคลเซียมไฮดรอก ไซด์ ($Ca(OH)_2$) ซึ่งเป็นสารประกอบที่ถูกชะละลายได้ง่ายเมื่อสัมผัสกับสารละลายกรด แตกต่างจากผลผลิตของมอร์ต้าร์ที่ทำวัสดุประสานกระตุ้นด้วยด่าง คือ สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอลูมิโลซิลิเกตไฮเดรต (CASH) ซึ่งสามารถต้านทานการชะละลายได้ดีกว่า [6], [14], [18]

4. สรุป

จากการศึกษาผลของการพัฒนากำลังอัดและการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการกัดกร่อนของกรดซัลฟิวริกของมอร์ต้าร์ที่ทำจากวัสดุประสานกระตุ้นด้วยด่างที่ใช้เถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงสามารถสรุปได้ดังนี้

4.1 ความต้องการสารลดน้ำพิเศษในส่วนผสมของมอร์ต้าร์กระตุ้นด้วยด่างที่ทำจากเถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้เป็นสารละลายด่างในการกระตุ้นกำลัง

4.2 จากการทดสอบกำลังอัดของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่ทำจากเถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงกระตุ้นด้วยด่าง พบว่า ส่วนผสมของมอร์ต้าร์ที่ทำจากเถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงจากโรงงานโดยตรงเป็นวัสดุประสานและใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกด์ไซด์ที่มีความเข้มข้น 6 โมลาร์ สามารถพัฒนากำลังอัดของมอร์ต้าร์ได้ดีที่สุด โดยสามารถรับกำลังอัดได้ถึง 160 กก/ซม^2 ที่อายุ 28 วัน และสามารถพัฒนากำลังอัดได้ถึง 189 กก/ซม^2 ที่อายุ 60 วัน

4.3 จากการทดสอบการสูญสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์เมื่อนำไปแช่กรดซัลฟิวริกที่มีความเข้มข้นร้อยละ 3 พบว่าส่วนผสมมอร์ต้าร์ที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 6M มีการสูญเสียน้ำหนักน้อยที่สุด โดยมีค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเท่ากับร้อยละ 1.39 ที่อายุการแช่กรดซัลฟิวริกเป็นเวลา 60 วัน

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ภายใต้เงินงบประมาณเงินรายได้ พ.ศ.2563

6. เอกสารอ้างอิง

[1] M. J. Nadoushan and A. A. Ramezanianpour, “The effect of type and concentration of activators on flowability and compressive strength of natural pozzolan and slag-based geopolymers,” *Construction and Building Materials*, vol. 111, pp. 337–347, May 2016.

[2] M. Najimi and N. Ghafoori, “Engineering properties of natural pozzolan/slag based alkali-activated concrete,” *Construction and Building Materials*, vol. 208, pp. 46–62, May 2019.

[3] F. Puertas, S. Martıńez-Ramıŕez, S. Alonso and T. Vazquez, “Alkali-activated flyash/slag cements: Strength behaviour and hydration products,” *Cement and Concrete Research*, vol. 30, no. 10, pp. 1625–1632, Oct. 2000.

[4] P.K. Mehta, “Global concrete industry sustainability,” *Concrete International,* vol. 31, no. 2 pp. 45–48, 2009.

[5] A. Fernández-Jiménez and A. Palomo, “Characterisation of fly ashes. Potential reactivity as alkaline cements,” *Fuel*, vol. 82, no. 18, pp. 2259–2265, Dec. 2003.

[6] T. Bakharev, “Resistance of geopolymer materials to acid attack,” *Cement*

and concrete research, vol. 35, no. 4, pp. 658–670, Apr. 2005.

[7] ASTM C109, "Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50 mm] Cube Specimens)," *American Society for Testing and Materials*, 2017.

[8] ASTM C618, "Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete," *American Society for Testing and Materials*, 2017.

[9] N. Makul and B. Chatveera, "Properties of Fly Ash-based Geopolymer Mortar: Influence of Fly Ash Sources and Sodium Silicate (Na_2SiO_3) / Sodium Hydroxide (NaOH) Ratios," *KMUTT Research and Development Journal*, vol. 36, no. 1, pp. 99–124, Jan.–Mar. 2013.

[10] E. Gomaa, S. Sargon, C. Kashosi and M. ElGawady, "Fresh properties and compressive strength of high calcium alkali activated fly ash mortar," *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, vol. 29, no. 4, pp. 356–364, Oct. 2017.

[11] F. Winnefeld, A. Leemann, M. Lucuk, P. Svoboda and M. Neuroth, "Assessment of phase formation in alkali activated low and high calcium fly ashes in building materials," *Construction and building materials*, vol. 24, no. 6, pp. 1086–1093, Jun. 2010.

[12] S. Dueramae, W. Tangchirapat, P. Chindaprasirt and C. Jaturapitakkul, "Influence of activation methods on strength and chloride resistance of concrete using calcium carbide residue–fly ash mixture as a new binder," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 29, no. 4, p. 04016265, Apr. 2017.

[13] S. Hanjitsuwan, B. Injorhor, T. Phoo-ngernkham, N. Damrongwiriyanupap, L.Y. Li, P. Sukontasukkul and P. Chindaprasirt, "Drying shrinkage, strength and microstructure of alkali-activated high-calcium fly ash using FGD-gypsum and dolomite as expansive additive," *Cement and Concrete Composites*, vol. 114, p. 103760, Nov. 2020.

[14] M. Eiamwijit, K. Pachana, S. Kaewpirom, U. Rattanasak and P. Chindaprasirt, "Comparative study on morphology of ground sub-bituminus FBC fly ash geopolymeric material," *Advanced Powder Technology*, vol. 26, pp. 1053–1057, Apr. 2015.

[15] Y. Rifaai, A. Yahia, A. Mostafa, S. Aggoun and E.H. Kadri, "Rheology of fly ash - based geopolymer: Effect of NaOH concentration," *Construction and Building Materials*, vol. 223, pp. 583–594, Oct. 2019.

[16] Sindhunata, J. L. Provis, G.C. Lukey, H. Xu and J.S. van Deventer, "Structural evolution of fly ash based geopolymers in alkaline environments," *Industrial & engineering chemistry research*, vol. 47, no. 9, pp. 2991–2999, May 2008.

[17] S. Sasui, G. Kim, J. Nam, A. van Riessen and M. Hadzima-Nyarko, "Effects of waste glass

as a sand replacement on the strength and durability of fly ash/GGBS based alkali activated mortar," *Ceramics International*, vol. 47, no. 15, pp. 21175–21196, Aug. 2021.

[18] C. Eakpanich, "A Study of Sulfuric Acid Attack on Mortar Containing Pozzolan," M.S. thesis, Dept. Civil Eng., King Mongkut"s University of Technology Thonburi, Bangkok, Thailand, 2003.