วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2023.12.004

บทความวิจัย

อิทธิพลของสภาวะการบ่มต่อกำลังของมอร์ต้าร์ที่ใช้วัสดุประสานกระตุ้นด้วยด่างจากเถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงและเถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำ

อภิวิชญ์ ทองรักษา[1] เซาฟีร์ ดีอราแม[1*] สิริชัย เพชร์รุ่ง[1] อรรคเดช อับดุลมาติน[2] และ ทวิช กล้าแท้[3]

[1] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
[2] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์
[3] หลักสูตรวิชาวิศวกรรมโยธา, วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
[*] ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: Saofee.d@mail.rmutk.ac.th

วันที่รับบทความ: 14 มิถุนายน 2566; วันที่ทบทวนบทความ: 15 สิงหาคม 2566; วันที่ตอบรับบทความ: 3 ตุลาคม 2566
วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 24 ธันวาคม 2566

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลการบ่มต่อการพัฒนากำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ใช้วัสดุประสานกระตุ้นด้วยด่างจากเถ้าถ่านหินที่มีองค์ประกอบของแคลเซียมที่ต่างกัน ได้แก่ การใช้เถ้าถ่านหินเถ้าแคลเซียมสูงและการใช้เถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงร่วมกับเถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำ ทำการศึกษาระยะเวลาการก่อตัว และการพัฒนากำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ทำจากวัสดุประสารกระตุ้นด้วยด่างที่ทำการบ่มอุณหภูมิห้องและบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากผลการทดสอบ พบว่า ปริมาณแคลเซียมในองค์ประกอบของ สารตั้งต้นส่งผลต่อการก่อตัวที่เร็วขึ้น โดยการใช้วัสดุประสานจากเถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงร่วมกับเถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำมีระยะเวลาการก่อตัวนานกว่าการใช้เถ้าถ่านหินแคลเซียมสูง การใช้เถ้าถ่านหินที่มีปริมาณของแคลเซียมสูงเป็นวัสดุประสานกระตุ้นด้วยด่างสามารถพัฒนากำลังอัดได้ดีกว่าการใช้เถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงร่วมกับเถ้าถ่านหินที่มีปริมาณแคลเซียมต่ำเมื่อบ่มที่อุณหภูมิห้อง เมื่อมีการบ่มด้วยความร้อนอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่า มอร์ต้าร์จากเถ้าถ่านหินกระตุ้นด้วยด่างที่ใช้เถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงร่วมกับเถ้าถ่านหินที่มีปริมาณแคลเซียมต่ำเป็นสารตั้งต้นสามารถพัฒนากำลังได้ดีกว่ามอร์ต้าที่ใช้เถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงเป็นสารตั้งต้นเพียงอย่างเดียว โดยมอร์ต้าร์ที่ใช้เถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงร่วมกับเถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำในอัตราส่วน 50:50 และบ่มด้วยความร้อนมีกำลังอัดเท่ากับ 151, 168, 187 และ 189 กก/ซม^2 ที่อายุ 7, 28, 45 และ 60 วัน ตามลำดับ

คำสำคัญ: วัสดุประสานกระตุ้นด้วยด่าง; เถ้าถ่านหินแคลเซียมสูง; เถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำ; กำลังอัด; การบ่มด้วยความร้อน

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2023.12.004

บทความวิจัย

Influence of Curing Conditions on Strength of Alkali Activated Mortar Made from High Calcium Fly Ash and Low Calcium Fly Ash

Apiwish Thongraksa[1], Saofee Dueramae[1*], Sirichai Pethrung[1], Akkadath Abdulmatin[2] and Tawich Klathae[3]

[1] Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Krungthep

[2] Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Princess of Naradhiwas University

[3] Department of Civil Engineering, College of Industrial Technology and Management, Rajamangala University of Technology

[*] Corresponding author, E-mail: Saofee.d@mail.rmutk.ac.th

Received: 14 June 2023; Revised: 15 August 2023; Accepted: 3 October 2023
Online Published: 24 December 2023

Abstract: This research aims to study the effect of curing conditions on the strength development of mortar made from alkali-activated fly ash with different calcium contents, which consist of high calcium fly ash and a combination of high and low calcium fly ash. The setting time and the development of compressive strength of the alkali-activated fly ash mortar under curing at ambient temperature and a temperature of 80 ^{o}C for 24 hours were investigated. The experimental results found that the calcium content in precursors affected the setting time, with higher calcium content resulting in a faster setting time. Using a blend of high and low calcium fly ash as a binder provided a longer setting time than the binder made with only high calcium fly ash. The alkali-activated mortar made with high calcium fly ash as a binder had higher strength than the blend of high and low calcium fly ash at ambient temperature. For the curing temperature of 80 ^{o}C, the binder made from high calcium fly ash had lower strength than the blend of high and low calcium fly ash. The compressive strength of alkali-activated mortar made from high calcium fly ash and low calcium fly ash in a 50:50 ratio with a curing temperature of 80 ^{o}C was 151, 168, 187 and 189 kg/cm^2 at 7, 28, 45, and 60 days, respectively.

Keywords: Alkali activated; High calcium fly ash; Low calcium fly ash; Compressive strength; Heat curing

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2023.12.004

1. บทนำ

ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุหลักที่ใช้ในงานก่อสร้างโดยทั่วไป ซึ่งใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสานสำหรับการผลิตคอนกรีตที่ใช้ในงานก่อสร้าง ในปัจจุบันความต้องการในการใช้ปูนซีเมนต์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการขยายตัวอุตสาหกรรมกรรมก่อสร้าง อย่างไรก็ตามกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมจากการปล่อยก๊าซเรือนกระจก เนื่องจากวัตถุดิบหลักในการผลิตปูนซีเมนต์คือหินปูน ($CaCO_3$) และเมื่อถูกนำมาเผาเพื่อผลิตปูนเม็ดจะปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) จำนวนมากสู่บรรยากาศ โดยการผลิตปูนซีเมนต์ 1 ตันจะปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่บรรยากาศถึง 0.82 ตัน [1] ในปัจจุบันมีการศึกษาการใช้วัสดุประสานชนิดใหม่เพื่อทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์ เช่น การใช้วัสดุประสานกระตุ้นด้วยด่างหรือจีโอพอลิเมอร์ โดยใช้สารตั้งต้นที่มีองค์ประกอบของ ซิลิกาออกไซด์ และ อลูมินาออกไซด์ และสารละลายด่างที่มีองค์ประกอบของโซเดียมหรือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และ/หรือซิลิเกต ซึ่งโดยทั่วไปมักใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) หรือโพแทสเซียม ไฮดรอกไซด์ (KOH) เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นโครงสร้างยึดประสานและรับกำลังได้

เถ้าถ่านหินเป็นวัสดุชนิดหนึ่งที่สามารถนำมาใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตวัสดุประสานกระตุ้นด้วยด่าง เนื่องจากเถ้าถ่านหินเป็นวัสดุที่มีองค์ประกอบของซิลิกา อลูมินา และเฟอร์ริก เป็นองค์ประกอบหลัก ทั้งนี้องค์ประกอบทางเคมีขึ้นอยู่กับชนิดของถ่านหิน และกระบวนการที่ใช้ในการเผา จากงานวิจัยของ Assi *et. al.* [2] ได้ทำการศึกษาการใช้เถ้าถ่านหินที่มีแคลเซียมต่ำผลิตเป็นจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต พบว่า เถ้าถ่านหินที่มีปริมาณแคลเซียมต่ำมีอัตราการทำปฏิกิริยาช้าที่อุณหภูมิห้อง ส่งผลต่อการพัฒนากำลังอัด โดยเฉพาะการพัฒนากำลังอัดในช่วงอายุต้น เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Wijaya and Hardjito [3] และ Rajmohan *et. al.* [4] ซึ่งพบว่าจีโอพอลิเมอร์ที่ทำจากเถ้าถ่านหินที่มีแคลเซียมต่ำส่งผลต่อระยะเวลาการก่อตัวที่ยาวนานกว่าและมีการพัฒนากำลังอัดในช่วงอายุต้นที่ต่ำ โดยทั่วไปจำเป็นที่ต้องใช้ความร้อนในการเร่งการเกิดปฏิกิริยาเพื่อให้สามารถรับกำลังได้ดีขึ้น นอกจากนั้นการใช้วัสดุที่มีองค์ประกอบของแคลเซียมร่วมกับเถ้าถ่านหินที่มีแคลเซียมต่ำสามารถช่วยให้เกิดการทำปฏิกิริยาได้ที่อุณภูมิห้อง Zhou *et. al.* [5] พบว่าเถ้าถ่านหินร่วมกับใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กร่วมสามารถพัฒนากำลังอัดให้เพิ่มขึ้นได้ เนื่องจากตะกรันเตาถลุงเหล็กมีองค์ประกอบของแคลเซียมสูงส่งผลต่อการเพิ่มปริมาณองค์ประกอบของแคลเซียมของสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยา เช่นเดียวกับผลการทดสอบของ Alanazi *et. al.* [6] พบว่าการเพิ่มตะกรันในส่วนผสมของวัสดุประสานกระตุ้นด้วยด่างส่งผลต่อการทำปฏิกิริยาและการพัฒนากำลังอัดที่อุณหภูมิห้องให้ดีขึ้น อย่างไรก็ตามงานวิจัยของ Nuaklong *et. al.* [7] ได้ทำการศึกษาผลของการใช้เถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงร่วมกับเถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำผลิตเป็นเป็นจีโอพอลิเมอร์ซึ่งใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกตและสารละลายโซเดียม-ไฮดรอกไซด์เป็นสารละลายด่าง พบว่า ปริมาณของเถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงในส่วนผสมส่งผลให้มีการก่อตัวที่รวดเร็วและสามารถพัฒนากำลังได้มากขึ้น

จากงานวิจัยที่ผ่านมาเห็นได้ว่าสมบัติของวัสดุประสานกระตุ้นด้วยด่างมีศักยภาพในการนำไปใช้เป็นวัสดุประสานในการผลิตคอนกรีตแทนการใช้ปูนซีเมนต์

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2023.12.004

อย่างไรก็ตามขึ้นอยู่กับสมบัติทางเคมีของสารตั้งต้นและสารละลายที่ใช้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาผลของการใช้เถ้าถ่านหินที่มีองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกัน ได้แก่ เถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงและเถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำในสร้างวัสดุประสานชนิดใหม่โดยไม่ใช้ปูนซีเมนต์ นอกจากนี้ยังศึกษาผลของการบ่มด้วยความร้อน เพื่อพัฒนาสมบัติทางกลของวัสดุประสานที่ทำจากเถ้าถ่านหินทั้ง 2 ชนิดที่มีองค์ประกอบทางเคมีที่ต่างกัน

2. วิธีการทดลอง

2.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

งานวิจัยนี้ใช้เถ้าถ่านหินเป็นสารตั้งต้นของวัสดุประสานกระตุ้นด้วยด่างในการหล่อตัวอย่างมอร์ต้าร์ โดยไม่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ เถ้าถ่านหินที่ใช้ในงานวิจัยที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากการผลิตกระแสไฟฟ้าซึ่งมาจากแหล่งที่ต่างกัน 2 แหล่ง ได้แก่ เถ้าถ่านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จ.ลำปาง (HFA) และเถ้าถ่านหินจากโรงไฟฟ้าจังหวัดระยอง (LFA) ผลการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหินจากทั้งสองแหล่งสำหรับงานวิจัยนี้แสดงในตารางที่ 1 พบว่า เถ้าถ่านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จ.ลำปาง (HFA) มีผลรวมออกไซด์ของซิลิกา อลูมินา และเฟอร์ริก เท่ากับร้อยละ 56.9 และมีแคลเซียมออกไซด์เท่ากับร้อยละ 29.6 จัดเป็นเถ้าถ่านหินที่มีแคลเซียมสูง (High-Calcium Fly Ash, Class C) ส่วนเถ้าถ่านหินที่ได้จากโรงไฟฟ้าจังหวัดระยอง (LFA) มีผลรวมออกไซด์ของซิลิกา อลูมินา และเฟอร์ริก เท่ากับร้อยละ 87.3 และมีแคลเซียมออกไซด์เท่ากับร้อยละ 0.7 จัดเป็นเถ้าถ่านหินที่มีปริมาณแคลเซียมต่ำ (Low-Calcium Fly Ash, Class F) ตามมาตรฐาน ASTM C618 [8] สำหรับ

ตารางที่ 1 Chemical Composition of Raw Materials

Oxide (%)	HFA	LFA
Silicon Dioxide (SiO_2)	24.2	53.1
Aluminum Oxide (Al_2O_3)	14.4	29.4
Iron Oxide (Fe_2O_3)	18.3	4.8
Calcium Oxide (CaO)	29.6	0.7
Sulfur Trioxide (SO_3)	6.5	0.4
Magnesium Oxide (MgO)	2.4	0.3
Sodium Oxide (Na_2O)	2.1	0.3
Potassium Oxide (K_2O)	0.3	0.7
Loss on Ignition (LOI)	0.6	5.4

สมบัติทางกายภาพของเถ้าถ่านหินที่ใช้ พบว่าเถ้าถ่านหิน HFA มีค่าความถ่วงจำเพาะ เท่ากับ 2.26 และมีขนาดอนุภาคค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 28.7 เถ้าถ่านหิน LFA มีค่าความถ่วงจำเพาะและมีร้อยละของขนาดอนุภาคค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากับ 2.45 และ 23.4 ตามลำดับ

2.2 ส่วนผสมของมอร์ต้าร์

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาผลของการใช้เถ้าถ่านหินจาก 2 แหล่งซึ่งมีองค์ประกอบทางของแคลเซียมออกไซด์ที่ต่างกัน ซึ่งใช้เถ้าถ่านหินแคลเซียมสูง (HFA100) และใช้เถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงร่วมกับเถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำในอัตราส่วน 50:50 (HFA50-LFA50) เป็นวัสดุประสานในการผลิตมอร์ต้าร์จากวัสดุประสานกระตุ้นด้วยด่าง (Alkali Activated Mortar) มอร์ต้าร์กระตุ้นด้วยด่างจากเถ้าถ่านหินในงานวิจัยนี้ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เข้มข้น 6 โมลาร์เป็นสารละลายด่างในการกระตุ้นกำลังส่วนผสม

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2023.12.004

ตารางที่ 2 Mix Proportion of Mortar

Sample	Mix Proportion (g)						L/S ratio	Flow (%)
	Cement	Fly ash		Sand	Water	NaOH Solution		
		HFA	LFA					
CT	740	-	-	2035	490	-	0.66	109
HFA100	-	740	-	2035	-	410	0.55	107
HFA50-LFA50	-	370	370	2035	-	410	0.55	110
HFA100-T	-	740	-	2035	-	410	0.55	107
HFA50-LFA50-T	-	370	370	2035	-	410	0.55	110

ของมอร์ต้าร์ใช้อัตราส่วนของสารละลายต่อวัสดุประสานหรือสารละลายต่อสารตั้งต้น (L/S) เท่ากับ 0.55 มีอัตราส่วนระหว่างวัสดุประสานต่อทราย เท่ากับ 1:2.75 หลังจากหล่อตัวอย่างเป็นเวลา 24 ชั่วโมงทำการถอดแบบและบ่มในน้ำจนกว่าจะถึงอายุการทดสอบ นอกจากนั้นทำการศึกษาผลของการบ่มด้วยความร้อน โดยนำตัวอย่างมอร์ต้าร์หลังจากถอดแบบไปบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนนำตัวอย่างไปบ่มในน้ำจนถึงอายุการทดสอบจนถึงอายุการทดสอบ (HFA100-T และ HFA50-LFA50-T) โดยอัตราส่วนผสมของมอร์ต้าร์แสดงในตารางที่ 2

2.3 การทดสอบการก่อตัวของมอร์ต้าร์

ทดสอบการก่อตัวของมอร์ต้าร์ ทำการทดสอบโดยประยุกต์ใช้การทดสอบการก่อตัวโดยใช้เข็มไวแคตตามมาตรฐาน ASTM C191 [9] เพื่อเปรียบเทียบผลของการก่อตัวของมอร์ต้าร์ที่ทำจากวัสดุประสานกระตุ้นด้วยด่างที่มีส่วนผสมของสารตั้งต้นที่แตกต่างกัน

2.4 การทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าร์

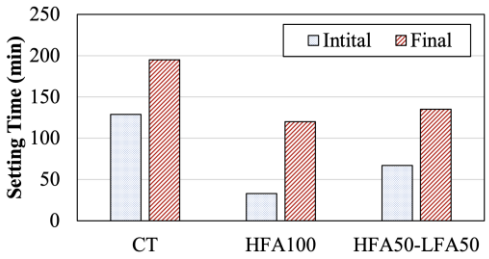
การทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าร์ใช้ตัวอย่างทรงลูกบาศก์ขนาด 5 x 5 x 5 ซม^3 ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C109 [10] โดยทดสอบที่อายุ 7, 28, 45 และ 60 วัน ซึ่งในแต่ละอายุการทดสอบทำการทดสอบตัวอย่างมอร์ต้าร์ จำนวน 3 ตัวอย่าง เพื่อนำมาหาค่าเฉลี่ย

3. วิเคราะห์ผลทดลอง

3.1 การก่อตัวของมอร์ต้าร์

ผลการทดสอบการก่อตัวของมอร์ต้าร์ที่ทำจากวัสดุประสานกระตุ้นด้วยด่างเปรียบเทียบกับมอร์ต้าร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานแสดงดังรูปที่ 1 จากผลการทดสอบพบว่า มอร์ต้าร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ (CT) มีค่าการก่อตัวเริ่มต้นและการก่อตัวสุดท้าย เท่ากับ 129 และ 195 นาที ตามลำดับ ส่วนมอร์ต้าร์ที่ใช้วัสดุประสานกระตุ้นด้วยด่างมีค่าการก่อตัวรวดเร็วกว่ามอร์ต้าร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ทั้งการก่อตัวเริ่มต้นและการก่อตัวสุดท้าย โดยมอร์ต้าร์ HFA100 ที่ใช้เถ้าถ่านหินแคลเซียมสูง

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2023.12.004



รูปที่ 1 Setting Time of Mortar

มีค่าการก่อตัวเริ่มต้นเท่ากับ 33 นาที และการก่อตัวสุดท้ายเท่ากับ 120 นาที ส่วนมอร์ต้าร์ HFA50-LFA50 ที่ใช้เถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงร่วมกับเถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำมีค่าการก่อตัวเริ่มต้นเท่ากับ 67 นาที และการก่อตัวสุดท้ายเท่ากับ 135 นาที จากผลการทดสอบเห็นได้ว่าการใช้วัสดุประสานกระตุ้นด้วยด่างจากเถ้าถ่านหินมีค่าการก่อตัวที่เร็วกว่ามอร์ต้าร์ที่ใช้วัสดุประสานที่ใช้ปูนซีเมนต์ โดยเฉพาะการใช้เถ้าถ่านหินที่มีองค์ประกอบของแคลเซียมในปริมาณสูง เนื่องจากเถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงสามารถทำปฏิกิริยาได้ดีกว่าเถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำที่อุณหภูมิห้อง [11] ดังนั้นเมื่อนำเถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำมาใช้ร่วมกับเถ้าถ่านหินที่มีแคลเซียมสูง (HFA50-LFA50) เพื่อเป็นสารตั้งต้นในการผลิตวัสดุประสานกระตุ้นด้วยด่างจึงมีระยะเวลาการก่อตัวนานขึ้น เนื่องด้วยมีปริมาณของแคลเซียมออกไซด์ในระบบของสารตั้งต้นที่ลดลง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Chindaprasirt *et. al.* [12] ซึ่งพบว่าปริมาณแคลเซียมในสารตั้งต้นมีผลต่อการเร่งการทำปฏิกิริยาและการสร้างสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ทำให้การก่อตัวเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว

3.2 กำลังอัดของมอร์ต้าร์

ตารางที่ 3 แสดงผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์และมอร์ต้าร์ที่ทำจากวัสดุประสานกระตุ้นด้วยด่างจากเถ้าถ่านหิน จากการทดสอบ พบว่า มอร์ต้าร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์มีกำลังอัดเท่ากับ 278, 294, 308 และ 313 กก/ซม^2 ที่อายุ 7, 28, 45 และ 60 วัน ตามลำดับ โดยกลุ่มของมอร์ต้าร์ที่ทำจากวัสดุประสานกระตุ้นด้วยด่างจากเถ้าถ่านหินที่มีแคลเซียมสูงและใช้เถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงร่วมกับเถ้าถ่านหินที่มีแคลเซียมต่ำที่มีการบ่มในน้ำ มีค่ากำลังอัดอยู่ระหว่าง 18 – 74 กก/ซม^2 ส่วนกลุ่มของมอร์ต้าร์ที่ทำจากวัสดุประสานกระตุ้นด้วยด่างจากเถ้าถ่านหินที่มีแคลเซียมสูงและใช้เถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงร่วมกับเถ้าถานหินที่มีแคลเซียมต่ำที่มีการบ่มที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมงก่อนนำไปบ่มในน้ำ มีค่ากำลังอัดอยู่ระหว่าง 97 – 189 กก/ซม^2 โดยที่กำลังอัดของกลุ่มมอร์ต้าร์ที่ใช้วัสดุประสานกระตุ้นด้วยด่างจากเถ้าถ่านหินที่บ่มในน้ำ ได้แก่มอร์ต้าร์ HFA100 มีค่าเท่ากับ 56 กก/ซม^2 ที่อายุ 7 วัน และเพิ่มเป็น 74 กก/ซม^2 ที่อายุ 60 วัน และมอร์ต้าร์ HFA50-LFA50 มีกำลังอัดเท่ากับ 18 และ 34 กก/ซม^2 ที่ 7 และ 60 วัน ตามลำดับ ในขณะเดียวกันกลุ่มของมอร์ต้าร์ที่ใช้วัสดุประสานกระตุ้นด้วยด่างจากเถ้าถ่านหินที่มีการบ่มด้วย

ตารางที่ 3 Compressive Strength of Mortar

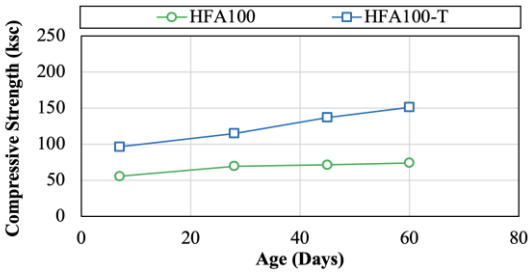
Sample	Compressive Strength (ksc)			
	7 Days	28 Days	45 Days	60 Days
CT	278	294	308	313
HFA100	56	69	72	74
HFA50-LFA50	18	27	32	34
HFA100-T	97	115	137	151
HFA50-LFA50-T	151	168	187	189

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2023.12.004

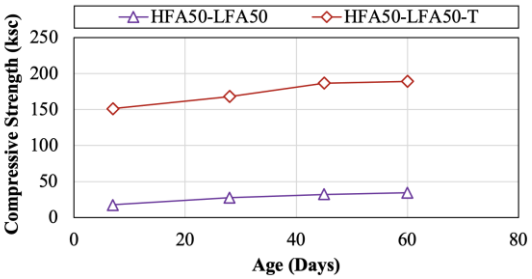
อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส (มอร์ต้าร์ HFA100-T และ HFA50-LFA50-T)มีกำลังอัดที่ อายุ 7 วัน เท่ากับ 97 และ 151 กก/ซม^2 และกำลังอัดที่ 60 วัน เพิ่มขึ้นเป็น 151 และ 189 กก/ซม^2 จากผลการทดสอบเห็นได้ว่า มอร์ต้าร์ที่ทำจากวัสดุประสานกระตุ้นด้วยด่างจากเถ้าถ่านหินมีแนวโน้มของการพัฒนากำลังที่เพิ่มขึ้นตามอายุการบ่มเช่นเดียวกับการใช้วัสดุประสานทั่วไปที่ทำจากปูนซีเมนต์ อย่างไรก็ตามจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า ผลิตภัณฑ์ที่เป็นโครงสร้างในการรับกำลังที่ได้จากวัสดุประสานกระตุ้นด้วยด่างเกิดจากกระบวนการที่แตกต่างกับการทำปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์ โดยโครงสร้างของวัสดุประสานกระตุ้นด้วยด่างเกิดจากการทำปฏิกิริยาของซิลิกา อลูมินา และแคลเซียมซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของเถ้าถ่านหิน ซึ่งถูกชะละลายด้วยสารละลายด่าง (โซเดียมไฮดรอกไซด์, NaOH) รวมตัวกันเป็นโครงสร้างของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และ แคลเซียมอลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต (C-A-S-H) ซึ่งเป็นโครงสร้างที่สามารถรับกำลังได้ [11, 13]

3.3 ผลของการบ่มต่อกำลังอัดของมอร์ต้าร์กระตุ้นด้วยด่างจากเถ้าถ่านหิน

ผลของการบ่มต่อการพัฒนากำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่วัสดุประสานกระตุ้นด้วยด่างจากเถ้าถ่านหินแสดงดังรูปที่ 2 จากผลการทดสอบเห็นได้ชัดเจนว่า การบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง สามารถพัฒนากำลังอัดของมอร์ต้าร์ได้ดีกว่ามอร์ต้าร์ที่บ่มในน้ำ ทั้งมอร์ต้าร์ที่มีสารตั้งต้นจากเถ้าถ่านหินที่มีแคลเซียมสูงและเถ้าถ่านหินที่มีแคลเซียมสูงร่วมกับเถ้าถ่านหินที่มีแคลเซียมต่ำ โดยมอร์ต้าร์ที่ทำจากเถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงกระตุ้นด้วยด่าง (รูปที่ 2 (a)) มีกำลังอัดอยู่ระหว่าง 56 – 74 กก/ซม^2 เมื่อบ่มในน้ำปกติ และเมื่อทำการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส พบว่า มอร์ต้าร์สามารถพัฒนากำลังอัดเพิ่มขึ้นเท่ากับ 97 – 151 กก/ซม^2 หรือคิดเป็นร้อยละ 42.6 ถึง 50.9 ผลการทดสอบมีแนวโน้มเช่นเดียวกับการใช้วัสดุประสานจากเถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงร่วมกับเถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำ (รูปที่ 2 (b)) พบว่าสามารถพัฒนากำลังอัดจาก 18 – 34 กก/ซม^2 เพิ่มขึ้นเป็น 151 – 189 กก/ซม^2 หรือคิดเป็นร้อยละ 81.2 ถึง 88.4 แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิการบ่มส่งผลต่อการพัฒนากำลังอัดของมอร์ต้าร์อย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ในการบ่มส่งผลต่ออัตราการทำปฏิกิริยาที่รวดเร็วขึ้น ทำให้โครงสร้างของเนื้อซีเมนต์เพสต์มีความแน่นขึ้น ส่งผลต่อการรับกำลังอัดที่สูงขึ้น [14]



(a) High Calcium Fly Ash



(b) Blend of High and Low Calcium Fly Ash

รูปที่ 2 Effect of Curing Conditions on Compressive Strength of Mortar

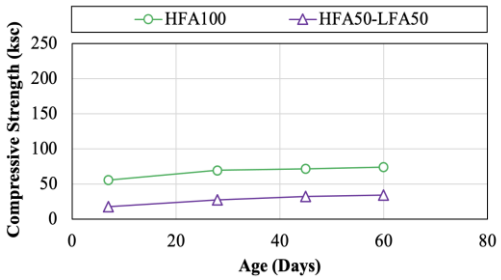
วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2023.12.004

นอกจากนั้น งานวิจัยของ Kumar and Kumar [15] พบว่า การบ่มด้วยความร้อนส่งผลโครงสร้างทางจุลภาคของเพสต์ซึ่งมีปริมาณการก่อตัวของอลูมิโน-ซิลิเกตเจล (Alumino-silicate Gel) ในโครงสร้างที่เพิ่มขึ้นและส่งผลต่อการพัฒนาสมบัติทางกลที่ดีขึ้น

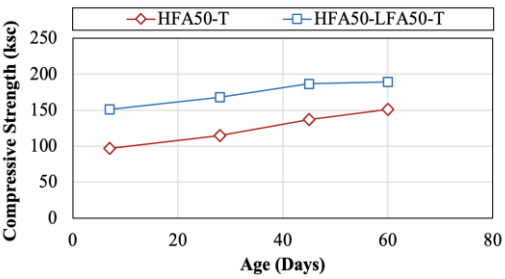
3.4 ผลของปริมาณแคลเซียมในเถ้าถ่านหินต่อกำลังอัดของมอร์ต้าร์กระตุ้นด้วยด่าง

รูปที่ 3 เปรียบเทียบผลของการใช้เถ้าถ่านหินที่มีแคลเซียมสูงและการใช้เถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงร่วมกับเถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำเพื่อเป็นสารตั้งต้นในการผลิตวัสดุประสานกระตุ้นด้วยด่างที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารละลายด่าง จากรูปที่ 3 (a) เห็นได้ว่าวัสดุประสานกระตุ้นด้วยด่างที่ใช้เถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงมีกำลังสูงกว่าการใช้เถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงร่วมกับเถ้าถ่านหินที่มีปริมาณแคลเซียมต่ำเมื่อบ่มในน้ำที่ โดยมอร์ต้าร์ HFA100 มีกำลังอัดเท่ากับ 56, 69, 72 และ 74 กก/ซม^2 ที่อายุ 7, 28, 45 และ 60 วัน ตามลำดับ ในขณะที่มอร์ต้าร์ HFA50-LFA50 มีกำลังอัดเท่ากับ 18, 27, 32 และ 34 กก/ซม^2 ที่อายุ 7, 28, 45 และ 60 วัน ตามลำดับ โดยทั่วไปการสร้างผลึกของโครงสร้างโซเดียมอลูมิโนซิลิเกตซึ่งทำหน้าที่ในการยึดประสานโครงสร้าง จำเป็นต้องใช้อุณหภูมิในการเร่งการเกิดปฏิกิริยา โดยเฉพาะสารตั้งต้นที่มีองค์ประกอบของแคลเซียมต่ำจะทำปฏิกิริยาได้น้อยที่อุณหภูมิห้อง [3, 4] ปริมาณของแคลเซียมออกไซด์ที่สูงมีผลต่อการเกิดโครงสร้างในการรับกำลังของวัสดุประสานและสามารถเกิดปฏิกิริยาได้ที่อุณหภูมิห้อง โดยปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ในวัสดุตั้งต้นที่สูงส่งผลต่อการเกิดโครงสร้างแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต (C-A-S-H) มากขึ้นให้สามารถรับกำลังที่สูงกว่า [16, 17] ทำให้มอร์ต้าร์ที่ใช้วัสดุประสานจากเถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงกระตุ้นด้วยด่างจึงมีการพัฒนากำลังอัดได้ดีกว่าที่อุณหภูมิห้อง

ในทางกลับกันจากผลการทดสอบเห็นได้ว่าการใช้เถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงร่วมกับเถ้าถ่านหินที่มีปริมาณแคลเซียมต่ำเป็นสารตั้งต้นสามารถพัฒนากำลังได้ดีกว่าการใช้เถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงเพียงอย่างเดียวเมื่อบ่มที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ดังรูปที่ 3 (b) โดยมอร์ต้าร์ HFA100-T มีกำลังอัดเท่ากับ 97, 115, 137 และ 151 กก/ซม^2 ที่อายุ 7, 28, 45 และ 60 วัน ตามลำดับ ส่วนมอร์ต้าร์ HFA50-LFA50-T มีกำลังอัดเท่ากับ 151, 168, 187 และ 189 กก/ซม^2 ที่อายุ 7, 28, 45 และ 60 วัน ตามลำดับ



(a) Curing in water



(b) Curing at 80 °C temperature

รูปที่ 3 Effect of Fly Ash Type on Compressive Strength of Mortar

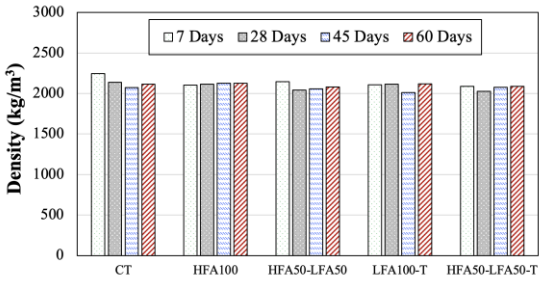
วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2023.12.004

เมื่อทำการบ่มด้วยความร้อนจะส่งผลต่อการเร่งการแตกตัวของโซเดียมไอออน (Na^+) และไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) จากสารละลายด่างและเข้าทำปฏิกิริยากับซิลิกาออกไซด์ (SiO) และอลูมินาออกไซด์ (AlO) ทำให้เกิดเป็นพันธะของโครงสร้างที่รับกำลังได้ [18] ดังนั้นมอร์ต้าร์ HFA50-LFA50-T ที่มีปริมาณของซิลิกาและอลูมินาออกไซด์ในสารตั้งต้นมากกว่า มอร์ต้าร์ HFA100-T เนื่องจากเถ้าถ่านหินที่มีแคลเซียมต่ำจะมีองค์ประกอบของซิลิกาออกไซด์และอลูมินาออกไซด์สูงกว่าเถ้าถ่านหินที่มีแคลเซียมสูง จึงทำให้มอร์ต้าร์มีกำลังอัดสูงกว่า

เมื่อบ่มที่อุณหภูมิสูง นอกจากนั้นงานวิจัยของ Myers *et. al.* [19] ชี้ให้เห็นว่าเมื่อมีอุณหภูมิการบ่มสูงขึ้น จะเกิดการทำปฏิกิริยาระหว่างอลูมินาออกไซด์อิสระ (Al-free) กับโครงสร้างแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ทำให้มีอัตราการก่อตัวของโครงสร้างแคลเซียมอลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต (C-A-S-H) จะเพิ่มขึ้นในระบบโครงสร้างทางจุลภาคและอาจมีผลทำให้สามารถรับกำลังได้มากขึ้น

3.5 ความหนาแน่นของของมอร์ต้าร์

ความหนาแน่นของมอร์ต้าร์ที่ใช้วัสดุประสานจากเถ้าถ่านหินกระตุ้นด้วยด่างเปรียบเทียบกับมอร์ต้าร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน แสดงดังรูปที่ 4 ผลการทดสอบ พบว่า มอร์ต้าร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานมีค่าความหนาแน่นอยู่ระหว่าง 2071 – 2245 กก/ม^3 ส่วนกลุ่มของมอร์ต้าร์กระตุ้นด้วยด่างที่ใช้เถ้าถ่านหิน มีค่าความหนาแน่นอยู่ระหว่าง 2013 – 2146 กก/ม^3 จากผลการทดสอบเห็นได้ว่ามอร์ต้าร์กระตุ้นด้วยด่างที่ใช้สารตั้งต้นจากเถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงและเถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงร่วมกับเถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำ มีค่าความหนาแน่นใกล้เคียงกับมอร์ต้าร์ทั่วไปที่ใช้ปูนซีเมนต์



รูปที่ 4 Density of Mortar

4. บทสรุป

จากผลการศึกษามอร์ต้าร์ที่ใช้วัสดุประสานกระตุ้นด้วยด่างที่ใช้สารตั้งต้นจากเถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงและเถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงร่วมกับเถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำ สามารถสรุปได้ดังนี้

1. มอร์ต้าร์ที่ทำจากวัสดุประสานกระตุ้นด้วยด่างจากเถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงมีระยะเวลาการก่อตัวเร็วกว่าการใช้สารตั้งต้นจากเถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงร่วมกับเถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำ อย่างไรก็ตามการใช้วัสดุประสานจากเถ้าถ่านหินกระตุ้นด้วยด่างทั้งสองชนิดมีระยะเวลาการก่อตัวที่เร็วกว่าวัสดุประสานที่ใช้ปูนซีเมนต์
2. จากการทดสอบกำลัง พบว่า มอร์ต้าร์ที่ใช้ส่วนผสมจากเถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงร่วมกับเถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำและบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงที่สุดเท่ากับ 189 กก/ซม^2 ที่อายุ 60 วัน

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2023.12.004

3. การใช้เถ้าถ่านหินที่มีปริมาณของแคลเซียมสูงเป็นวัสดุประสานกระตุ้นด้วยด่างสามารถพัฒนากำลังอัดได้ดีกว่าการใช้เถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงร่วมกับเถ้าถ่านหินที่มีปริมาณแคลเซียมต่ำเมื่อบ่มที่อุณหภูมิห้อง

4. เมื่อมีการบ่มด้วยความร้อนอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่า มอร์ต้าร์จากเถ้าถ่านหินกระตุ้นด้วยด่างที่ใช้เถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงร่วมกับเถ้าถ่านหินที่มีปริมาณแคลเซียมต่ำเป็นสารตั้งต้นสามารถพัฒนากำลังได้ดีกว่ามอร์ต้าที่ใช้เถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงเป็นสารตั้งต้นเพียงอย่างเดียว

5. จากผลการทดสอบความหนาแน่นของมอร์ต้าร์ พบว่า กลุ่มของมอร์ต้าร์ที่ใช้เถ้าถ่านหินกระตุ้นด้วยด่างเป็นวัสดุประสานมีค่าความหนาแน่นใกล้เคียงกับมอร์ต้าร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

6. เอกสารอ้างอิง

[1] 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.

[2] L.N. Assi, E.E. Deaver, M.K. ElBatanouny, and P. Ziehl, Investigation of early compressive strength of fly ash-based geopolymer concrete, Construction and Building Materials, 2016, 112, 807-815.

[3] S.W. Wijaya and D. Hardjito, Factors affecting the setting time of fly ash-based geopolymer, Materials Science Forum, 2016, 841, 90-97.

[4] B. Rajmohan, R.R. Nayaka, K.R. Kumar and K. Kaleemuddin, Mechanical and durability performance evaluation of heat cured low calcium fly ash based sustainable geopolymer concrete, Materials Today: Proceedings, 2022, 58, 1337-1343.

[5] S. Zhou, C. Ma, G. Long and Y. Xie, A novel non-Portland cementitious material: Mechanical properties, durability and characterization, Construction and Building Materials, 2020, 238, 117671.

[6] H. Alanazi, J. Hu and Y.R. Kim, Effect of slag, silica fume, and metakaolin on properties and performance of alkali-activated fly ash cured at ambient temperature, Construction and Building Materials, 2019, 197, 747-756.

[7] P. Nuaklong, A. Wongsa, V. Sata, K. Boonserm, J. Sanjayan and P. Chindaprasirt, Properties of high-calcium and low-calcium fly ash combination geopolymer mortar containing recycled aggregate, Heliyon, 2019, 5(9) e02513.

[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.

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2023.12.004

[9] ASTM C191, Standard Test Methods for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle, American Society for Testing and Materials, 2021.

[10] 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, 2020.

[11] T. Phoo-Ngernkham, V. Sata, S. Hanjitsuwan, C. Ridtirud, S. Hatanaka and P. Chindaprasirt, High calcium fly ash geopolymer mortar containing Portland cement for use as repair material, Construction and building materials, 2015, 98, 482-488.

[12] P. Chindaprasirt, P. De Silva, K. Sagoe-Crentsil and S. Hanjitsuwan, Effect of SiO_2 and Al_2O_3 on the setting and hardening of high calcium fly ash-based geopolymer systems, Journal of Materials Science, 2012, 47, 4876-4883.

[13] U. Rattanasak and P. Chindaprasirt, Influence of NaOH solution on the synthesis of fly ash geopolymer. Minerals Engineering, 2009, 22(12), 1073-1078.

[14] 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, 2017, 29(4), 04016265.

[15] S. Kumar and R. Kumar, Mechanical activation of fly ash: Effect on reaction, structure and properties of resulting geopolymer, Ceramics International, 2011, 37(2), 533-541.

[16] S. Hanjitsuwan, S. Hunpratub, P. Thongbai, S. Maensiri, V. Sata and P. Chindaprasirt, Effects of NaOH concentrations on physical and electrical properties of high calcium fly ash geopolymer paste, Cement and Concrete Composites, 2014, 45, 9-14.

[17] S. Dueramae, W. Tangchirapat, P. Sukontasukkul, P. Chindaprasirt and C. Jaturapitakkul, Investigation of compressive strength and microstructures of activated cement free binder from fly ash-calcium carbide residue mixture, Journal of Materials Research and Technology, 2019, 8(5), 4757-4765.

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2023.12.004

[18] P. Sajan, T. Jiang, C. Lau, G. Tan and K. Ng, Combined effect of curing temperature, curing period and alkaline concentration on the mechanical properties of fly ash-based geopolymer, Cleaner Materials, 2021, 1, 100002.

[19] R.J. Myers, E. L'Hôpital, J.L. Provis and B. Lothenbach, Effect of temperature and aluminium on calcium (alumino) silicate hydrate chemistry under equilibrium conditions, Cement and Concrete Research, 2015, 68, 83-93.