

กำลังอัด การดูดซึมน้ำ และการเปลี่ยนแปลงความยาวของคอนกรีตบล็อกใช้ วัสดุประสานกระตุ้นด้วยต่างจากเถ้าถ่านหิน

Compressive strength, Water Absorption and Length Change of Concrete Block Made from Alkali Activated Fly Ash

อรรคเดช อับดุลมาติน¹ ปกป้อง รัตนชู¹ เซาฟีร์ ดือราแม^{2*} รัตนศักดิ์ หงษ์ทอง² และ อภัย เบญจพงษ์² Akkadath
Abdulmatin¹, Pokpong Rattanachu¹, Saofee Dueramae^{2*}, Rattanasak Hongthong²
and Apai Benchaphong²

Received: 8 October 2021, Revised: 15 November 2021, Accepted: 22 November 2021

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติของคอนกรีตบล็อกที่ใช้วัสดุประสานกระตุ้นด้วยต่างจากเถ้าถ่านหินโดยไม่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยส่วนผสมของวัสดุประสานกระตุ้นด้วยต่างที่ทำจากเถ้าถ่านหิน โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และสารละลายโซเดียมซิลิเกตเป็นสารละลายต่าง ทดสอบกำลังอัดที่อายุ 7 14 และ 28 วัน ทดสอบการดูดซึมน้ำพร้อมทั้งทดสอบการเปลี่ยนแปลงความยาวเมื่อแช่ในน้ำของคอนกรีตบล็อกที่อายุ 28 วัน ผลการทดสอบพบว่า กำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอายุการบ่ม โดยวัสดุประสานกระตุ้นด้วยต่างที่ทำจากเถ้าถ่านหิน และการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร่วมกับสารละลายโซเดียมซิลิเกต (คอนกรีต FA-6M-NS) สามารถรับกำลังอัดได้สูงสุด ซึ่งสามารถพัฒนาความแข็งแรงได้ถึง 249 กก./ซม.² ที่อายุ 28 วัน คอนกรีตบล็อกที่ทำจากเถ้าถ่านหินกระตุ้นด้วยต่างมีค่าการดูดซึมน้ำอยู่ในช่วงระหว่างร้อยละ 9.4 - 10.1 และมีค่าการเปลี่ยนแปลงของความยาวมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 0.12 - 0.33 นอกจากนี้ คอนกรีตบล็อกที่ทำจากเถ้าถ่านหินกระตุ้นด้วยต่างทุกส่วนผสมมีปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์น้อยกว่าการใช้วัสดุประสานจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์อย่างเห็นได้ชัด ซึ่งถือว่าเป็นวัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เมื่อเปรียบเทียบจากการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากวัตถุดิบ

คำสำคัญ: คอนกรีตบล็อก, วัสดุประสานกระตุ้นด้วยต่าง, เถ้าถ่านหิน, การดูดซึมน้ำ, การเปลี่ยนแปลงความยาว

¹ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏวราชนครินทร์ จังหวัดฉะเชิงเทรา 96000

¹ Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Princess of Naradhiwas University, Naradhiwas 96000, Thailand.

² ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ กรุงเทพมหานคร 10120

² Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Krungthep, Bangkok 10120, Thailand.

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): saofee.d@mail.rmuk.ac.th

ABSTRACT

This research aims to study the properties of concrete block made from alkali activated fly ash to use as cementitious material without Portland cement. Sodium hydroxide and sodium silicate solutions were used as an alkaline solution in the mixture of alkali activated fly ash. The compressive strength of concrete block was determined at 7, 14 and 28 days. The water absorption and change in length after immersed in water were also investigated at 28 days. The result found that the compressive strength of concrete block made from alkali activated as a cementitious material was increased with curing age. The using of sodium hydroxide combined with sodium silicate solution (FA-6M-NS concrete) was achieved the highest compressive strength, which could be developed compressive strength up to 249 kg/cm^2 at 28 days. The test results of water absorption and length change when immersed in water of concrete block made from alkali activated fly ash were ranging from 9.4 - 10.5 % and 0.12 - 0.33 %, respectively. Moreover, the concrete block made from alkali activated fly ash had significantly less release CO_2 emission than that of concrete using Portland cement as binder, which was eco-friendly material when compared with CO_2 emission obtained from raw materials.

Key words: concrete block, alkali activated, fly ash, water absorption, length change

บทนำ

คอนกรีตบล็อกเป็นหนึ่งในผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปที่ใช้กันอย่างแพร่หลายทั้งในประเทศและต่างประเทศ โดยส่วนใหญ่คอนกรีตบล็อกผลิตขึ้นจากส่วนผสมของปูนซีเมนต์เป็นวัสดุหลักในการเชื่อมประสานส่วนผสมอื่นเข้าด้วยกัน เนื่องจากปูนซีเมนต์เป็นวัตถุดิบที่สามารถหาได้ง่าย สะดวกในด้านการใช้งาน อย่างไรก็ตาม การใช้ปูนซีเมนต์อาจส่งผลกระทบต่างๆ มากมายต่อสิ่งแวดล้อม กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์มีทั้งด้านการทำลายทรัพยากรธรรมชาติและด้านการทำลายสิ่งแวดล้อม ซึ่งในปัจจุบันความต้องการใช้ปูนซีเมนต์มีปริมาณมาก และมีแนวโน้มที่สูงขึ้นตามการเติบโตของเศรษฐกิจ โดยในปี 2563 ประเทศไทยมีการผลิตปูนซีเมนต์ 39.87 ล้านตัน (The Office of Industrial Economics, 2020)

ในปัจจุบันปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะปัญหาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (climate change) ถือเป็นปัญหาที่มีความสำคัญ การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) สู่ชั้นบรรยากาศเป็นสาเหตุหลักที่ส่งผลกระทบต่อ การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ อุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์เป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณสูงโดยการผลิตปูนซีเมนต์ต้องใช้พลังงานในการเผาสูงถึง $1,500^\circ\text{C}$ และมีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ในปริมาณที่สูงถึงประมาณ 0.9 ตัน ต่อการผลิตปูนซีเมนต์ 1 ตัน (Mehta, 2009; Turner and Collins, 2013)

จากปัญหาข้างต้น ทำให้มีงานวิจัยที่มีการใช้วัสดุปอซโซลานซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากการผลิตกระแสไฟฟ้า เช่น เถ้าถ่านหิน เถ้าขานอ้อย เถ้าแกลบ และเถ้าปาล์มน้ำมัน ใช้แทนที่ในส่วนผสมของคอนกรีตเพื่อลดปริมาณปูนซีเมนต์ อย่างไรก็ตาม การ

ใช้วัสดุปอชโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์นั้นสามารถลดปริมาณปูนซีเมนต์ได้เพียงบางส่วน โดยแทนที่ในอัตราที่ต่ำ (น้อยกว่าร้อยละ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน) ปูนซีเมนต์จึงยังเป็นวัสดุประสานหลักที่ใช้ในการผลิตคอนกรีต ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาวัสดุประสานที่ใช้ทดแทนปูนซีเมนต์โดยใช้วัสดุประสานกระตุ้นด้วยด่าง (alkali activated material) โดยไม่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ วัสดุประสานที่ทำการกระตุ้นด้วยด่างเป็นวัสดุที่ทำการสังเคราะห์ขึ้นและมีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานคล้ายกับปูนซีเมนต์ ประกอบไปด้วยสารตั้งต้นหลัก คือ แคลเซียม ซิลิกา และอลูมินา โดยมีสารละลายด่างได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หรือ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) (Nadoushan and Ramezaniapour, 2016; Najimi and Ghafoori, 2019) ที่มีหน้าที่กระตุ้นและชะละลายออกไซด์จากวัสดุตั้งต้น ทำปฏิกิริยากันเป็นโครงสร้างของผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในรูปของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) แคลเซียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต (CASH) และโซเดียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต (NASH) (Puertas *et al.*, 2000) ทั้งนี้ผลผลิตที่ได้ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุตั้งต้น อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา และความเข้มข้นของสารละลายด่างที่ใช้ นอกจากนั้นการใช้โซเดียมซิลิเกตเป็นการเพิ่มสารประกอบของซิลิกาในสารตั้งต้น ส่งผลต่อการทำปฏิกิริยาและทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่เพิ่มขึ้น (Singh and Subramaniam, 2017) จากงานวิจัยของ Gavalı *et al.* (2019) พบว่า การใช้สารละลายด่างในกลุ่มที่มีโซเดียมในส่วนประกอบทั้งโซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมซิลิเกต มีความเหมาะสมกับการนำใช้งานการผลิตคอนกรีตบล็อก

มากกว่าสารละลายด่างกลุ่มโพแทสเซียม ทั้งในด้านสมบัติทางกลและความเหมาะสมทางด้านต้นทุน

การศึกษาในครั้งนี้เป็นการศึกษาคอนกรีตบล็อกที่ใช้วัสดุประสานกระตุ้นด้วยด่างจากเถ้าถ่านหิน (alkali activated fly ash) โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) เป็นสารละลายด่าง เพื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตบล็อกที่ใช้ปูนซีเมนต์ โดยทำการศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการกระตุ้นและการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร่วมกับสารละลายโซเดียมซิลิเกต โดยศึกษาสมบัติด้านการรับกำลังอัด อัตราการดูดซึมของน้ำและการเปลี่ยนแปลงความยาวเนื่องจากการดูดซึมน้ำ

วิธีดำเนินการวิจัย

1. วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

งานวิจัยนี้ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานสำหรับคอนกรีตควบคุมปูนซีเมนต์ที่ใช้มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.15 และใช้เถ้าถ่านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จ.ลำปาง โดยเถ้าถ่านหินที่เป็นวัสดุประสานสำหรับกลุ่มของคอนกรีตที่ใช้วัสดุประสานกระตุ้นด้วยด่าง ใช้เถ้าถ่านหินจากโรงงานโดยตรงซึ่งมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.26 มีขนาดอนุภาคข้างบนตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 28.7 ตารางที่ 1 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ พบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตและประเภทที่ 1 มีองค์ประกอบของแคลเซียมออกไซด์เป็นหลัก เท่ากับร้อยละ 69.00 ส่วนเถ้าถ่านหินที่ใช้มีผลรวมของซิลิกอนออกไซด์ อลูมินาออกไซด์ และเฟอร์ริกออกไซด์ เท่ากับ 57.02 มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ เท่ากับ 29.56 จัดเป็นเถ้าถ่านหิน Class C ตามมาตรฐาน ASTM C618 (2019)

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ

Oxide (%)	Ordinary Portland cement (OPC)	Fly Ash
Silicon Dioxide (SiO ₂)	16.10	24.25
Aluminum Oxide (Al ₂ O ₃)	3.82	14.43
Iron Oxide (Fe ₂ O ₃)	3.59	18.34
Calcium Oxide (CaO)	69.00	29.56
Sulfur Trioxide (SO ₃)	4.70	6.46
Magnesium Oxide (MgO)	0.93	2.44
Sodium Oxide (Na ₂ O)	0.36	2.09
Potassium Oxide (K ₂ O)	0.78	0.26
Loss on Ignition (LOI)	0.40	0.60

2. การทดสอบสมบัติทางกลพื้นฐานของวัสดุ

การวิเคราะห์สารประกอบและสมบัติทางกลพื้นฐานของวัสดุประสานที่ใช้ในงานวิจัย ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าถ่านหิน โดยทดสอบด้วยเครื่อง X-Ray Diffraction (XRD) ซึ่งใช้เทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

3. อัตราส่วนผสม

ส่วนผสมของคอนกรีตบล็อกที่ใช้วัสดุประสาน กระตุ้นด้วยด่างจากเถ้าถ่านหินใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และโซเดียมซิลิเกต (Na₂SiO₃) เป็นสารละลายต่างเปรียบเทียบกับคอนกรีตบล็อกที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน ส่วนผสมของคอนกรีตบล็อก มีอัตราส่วนวัสดุประสาน : ทราย : หิน เท่ากับ 1 : 1.5 : 1.75 ใช้ทรายที่มีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 3.1 และหินที่มีค่า

โมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 5.2 โดยอัตราส่วนผสมของหินและทรายที่แสดงดังตารางที่ 2 เป็นน้ำหนักของมวลรวมที่มีสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง ใช้อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสาน (L/B) เท่ากับ 0.67 และใช้สารลดน้ำพิเศษประเภท (Type) F เพื่อควบคุมค่าการยุบตัวให้อยู่ระหว่าง 5 - 10 เซนติเมตร โดยทำการศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการกระตุ้น (ส่วนผสม FA-4M ใช้ NaOH ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 4 โมลาร์ และส่วนผสม FA-6M ใช้ NaOH ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 6 โมลาร์) นอกจากนั้นศึกษาผลของการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร่วมกับสารละลายโซเดียมซิลิเกตในอัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก (ส่วนผสม FA-6M-NS)

ตารางที่ 2 อัตราส่วนผสมของคอนกรีตบล็อก

Sample	Mix proportion (kg/m ³)							L/B	Super Plasticizer (%)
	OPC	Fly ash	Fine aggregate	Coarse aggregate	NaOH	Na ₂ SiO ₃	Water		
CT	525	-	735	920	-	-	352	0.67	-
FA-4M	-	525	735	920	53	-	352	0.67	0.39
FA-6M	-	525	735	920	85	-	352	0.67	0.39
FA-6M-NS	-	525	735	920	85	85	352	0.67	0.39

4. การทดสอบกำลังอัด

การทดสอบหาลำดั้ด้านทานแรงอัดของคอนกรีตบดลือกใช้ตัวอย่างทดสอบรูปลูกบาศก์ขนาด $10 \times 10 \times 10$ เซนติเมตร³ โดยหลังจากผสมและหล่อตัวอย่างลงในแบบหล่อทำการเก็บตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิห้องและแกะแบบหลังจากหล่อเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปบ่มในน้ำจนกว่าจะถึงอายุการทดสอบ ซึ่งทำการทดสอบที่อายุ 7, 14 และ 28 วัน แต่ละอายุใช้ 3 ตัวอย่างเพื่อหาค่าเฉลี่ย

5. การทดสอบอัตราการดูดซึมน้ำ

การทดสอบอัตราการดูดซึมน้ำของคอนกรีตบดลือกใช้ตัวอย่างขนาด $4 \times 4 \times 16$ เซนติเมตร³ โดยการ

ทดสอบหาลำดั้การเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักขึ้นตัวอย่างเมื่อแช่น้ำ โดยใช้ตัวอย่างที่มีอายุ 28 วัน ซึ่งเตรียมตัวอย่างโดยการอบขึ้นทดสอบที่อุณหภูมิ 105 ± 5 องศาเซลเซียส ไม่น้อยกว่า 24 ชั่วโมง จากนั้นวางทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้องไม่น้อยกว่า 4 ชั่วโมง ทำการชั่งน้ำหนักของแต่ละตัวอย่างหลังจากแช่น้ำให้ท่วมเป็นเวลา 0, 1, 3, 6, 24, 72 และ 168 ชั่วโมง ในการชั่งน้ำหนักของตัวอย่างแต่ละครั้ง ใช้ผ้าเช็ดที่ผิวขึ้นทดสอบแต่ละก้อนและทำการชั่งตัวอย่างให้เสร็จภายในเวลา 3 นาที ทำการคำนวณหาลำดั้การดูดซึมน้ำได้โดยใช้สมการที่ (1)

$$\text{Water Absorption} = \frac{W_2 - W_1}{W_1} \times 100 (\%) \quad (1)$$

เมื่อ	Water Absorption	คือ การดูดซึมน้ำ ณ เวลาใดๆ	
	W_1	คือ น้ำหนักตัวอย่างที่สภาพอบแห้ง (เริ่มต้น)	(กรัม)
	W_2	คือ น้ำหนักตัวอย่าง ณ อายุการทดสอบ	(กรัม)

6. การทดสอบการเปลี่ยนแปลงความยาวเมื่อแช่น้ำ

การทดสอบอัตราการเปลี่ยนแปลงความยาวของคอนกรีตบดลือกจากการดูดซึมน้ำ โดยใช้ตัวอย่างขนาด $4 \times 4 \times 16$ เซนติเมตร³ ที่มีอายุ 28 วัน ซึ่งเตรียมตัวอย่างโดยการอบขึ้นทดสอบที่อุณหภูมิ 105 ± 5 องศาเซลเซียส ไม่น้อยกว่า 24 ชั่วโมง จากนั้นวาง

ทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้องไม่น้อยกว่า 4 ชั่วโมง ในการทดสอบทำโดยการวัดความยาวของตัวอย่างที่แช่ให้จมอยู่ในน้ำเป็นเวลา 0, 1, 3, 6, 24, 72 และ 168 ชั่วโมง ซึ่งสามารถคำนวณอัตราการเปลี่ยนแปลงของความยาวได้ดังสมการที่ (2)

$$\text{Length change} = \frac{L_2 - L_1}{L_1} \times 100 (\%) \quad (2)$$

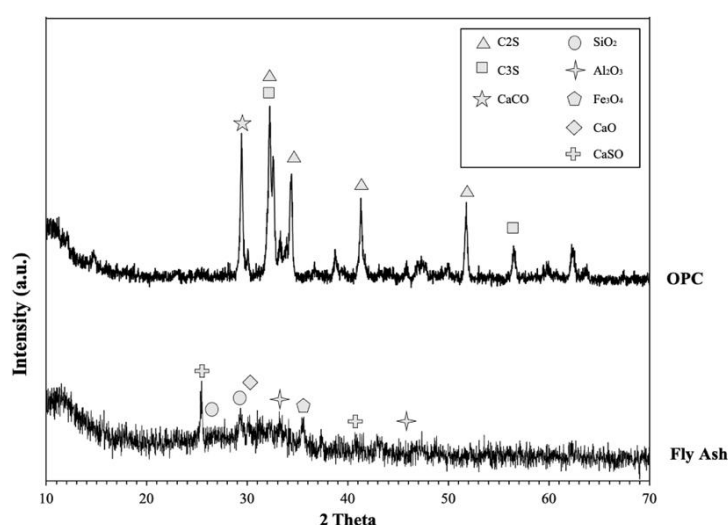
เมื่อ	Length change	คือ การเปลี่ยนแปลงของความยาวจากการดูดซึมน้ำ ณ เวลาใดๆ	
	L_1	คือ ความยาวตัวอย่างที่สภาพอบแห้ง (เริ่มต้น)	(มิลลิเมตร)
	L_2	คือ ความยาวของตัวอย่าง ณ อายุการทดสอบ	(มิลลิเมตร)

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. สมบัติทางสัณฐานวิทยาของวัสดุ

สมบัติทางสัณฐานวิทยาของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (OPC) และเถ้าถ่านหิน (FA) แสดงดังภาพที่ 1 ซึ่งแสดงอยู่ในรูปจุดยอด (peak) โครงสร้างผลึกของสารประกอบที่มีของวัสดุ ณ ตำแหน่งต่างๆ ผลการทดสอบพบว่าองค์ประกอบของหลักปูนซีเมนต์ ได้แก่ ไคแคลเซียม

ซิลิเกต (C2S) และไตรแคลเซียมซิลิเกต (C3S) ส่วนเถ้าถ่านหินที่ใช้ในงานวิจัยนี้สามารถตรวจพบ ได้แก่ ควอตซ์ (SiO_2), แคลเซียมออกไซด์ (CaO), อะลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3), เฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) และแอนไฮไดรต์ (CaSO_4) และสามารถพบสารประกอบที่ไม่เป็นผลึกอยู่ในช่วงระหว่าง $20 - 40^\circ 2\text{-Theta}$ ซึ่งความไม่เป็นผลึกหรือความเป็นอสัณฐานของเถ้าถ่านหินนั้นแสดงให้เห็นว่าวัสดุมีความว่องไวต่อการทำปฏิกิริยา



ภาพที่ 1 XRD ของวัสดุประสาน

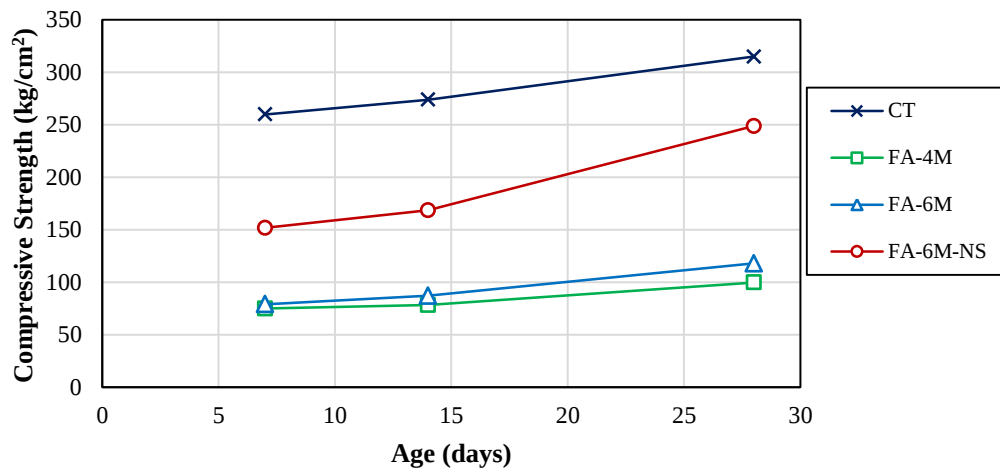
2. กำลังอัดของคอนกรีต

ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตบล็อกที่ใช้วัสดุประสานจากเถ้าถ่านหิน ซึ่งมีการใช้สารละลายด่างที่แตกต่างกันเปรียบเทียบกับคอนกรีตบล็อกควบคุมซึ่งใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานแสดงไว้ดังภาพที่ 2 จากผลการทดสอบพบว่าการพัฒนากำลังของคอนกรีตที่ทำจากวัสดุประสานกระตุ้นด้วยด่างมีแนวโน้มการพัฒนา กำลังไปในทิศทางเดียวกับปูนซีเมนต์ กล่าวคือมีการพัฒนา กำลังอัดที่เพิ่มขึ้นเมื่อมีอายุการบ่มที่นานขึ้น เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบกำลังอัดของกลุ่มคอนกรีตซึ่งใช้วัสดุประสานจากเถ้าถ่านหินกระตุ้นด้วยด่าง พบว่า การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นมากขึ้นจาก 4 โมลาร์เป็น 6 โมลาร์

สามารถกระตุ้นการพัฒนา กำลังอัดของคอนกรีตบล็อกได้มากขึ้น โดยคอนกรีต FA-4M มีกำลังอัดเท่ากับ 75, 78 และ 100 กก/ซม² ที่อายุ 7, 14 และ 28 วัน ตามลำดับ ส่วนคอนกรีต FA-6M มีกำลังอัดเท่ากับ 79, 87 และ 118 กก/ซม² ที่อายุ 7, 14 และ 28 วัน ตามลำดับ เนื่องจากสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ทำหน้าที่ใช้การชะละลายออกไซด์ของเถ้าถ่านหินออกมา ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยามากขึ้น จึงมีการพัฒนา กำลังอัดเพิ่มขึ้น (Rifaai *et al.*, 2019; Dueramac *et al.*, 2019) นอกจากนี้พบว่า คอนกรีตบล็อกที่ทำจากวัสดุประสานกระตุ้นด้วยด่างที่ใช้การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร่วมกับสารละลายโซเดียมซิลิเกต (คอนกรีต FA-6M-NS) สามารถพัฒนา กำลังได้ดียิ่งขึ้น โดยมีกำลัง

อัดที่อายุ 7, 14 และ 28 วัน เท่ากับ 152, 169 และ 249 กก/ชม² ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Singh and Subramaniam (2017) พบว่า การใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกตเป็นการเพิ่มสารประกอบของซิลิกาในสารตั้งต้น ส่งผลต่อการทำปฏิกิริยาและทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) เพิ่มขึ้น

นอกจากนั้นยังทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ของโซเดียมอะลูมิโนซิลิเกต (NASH) ซึ่งส่งผลต่อการรับกำลังอัดที่เพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาผลของกำลังอัด พบว่า คอนกรีตบล็อกทุกส่วนผสมสามารถนำไปใช้งาน เนื่องจากมีค่ากำลังอัดมากกว่า 5.5 เมกะพาสคัล หรือ 55 กก/ชม² ตามมาตรฐาน มอก. (TIS 57, 1990)

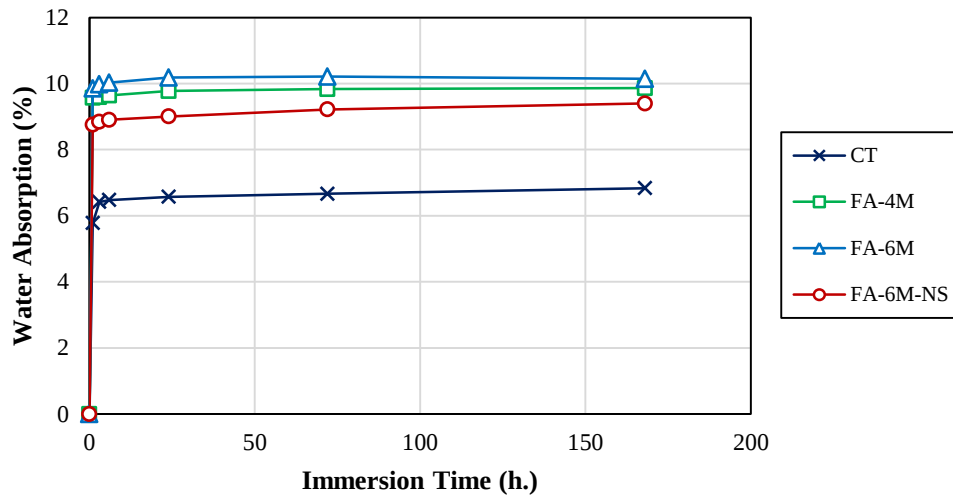


ภาพที่ 2 กำลังอัดของคอนกรีตบล็อก

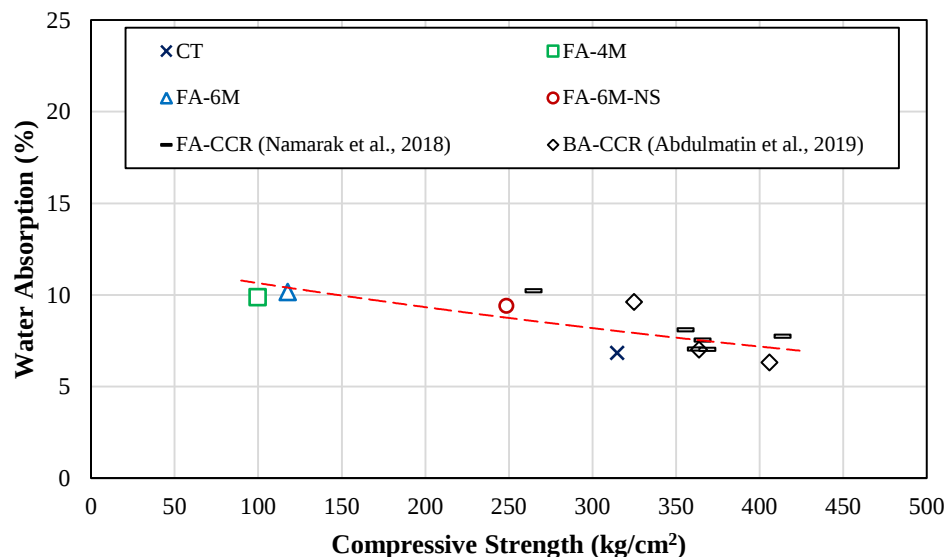
3. การดูดซึมของน้ำ

การทดสอบการดูดซึมของน้ำทดสอบโดยการวัดการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักของตัวอย่างคอนกรีตบล็อกเมื่อแช่ในน้ำซึ่งทำการทดสอบโดยการชั่งน้ำหนักของคอนกรีตหลังจากแช่น้ำเป็นระยะเวลา 168 ชั่วโมง จากการทดสอบพบว่า คอนกรีตบล็อกที่ใช้เถาถ่านหินกระตุ้นด้วยด่างมีค่าอยู่ในช่วงระหว่างร้อยละ 9.4 - 10.1 ขณะที่คอนกรีตบล็อกที่ใช้ปูนซีเมนต์มีค่าการดูดซึมของน้ำเท่ากับร้อยละ 6.8 (แสดงดังภาพที่ 3) เห็นได้ชัดเจนว่า คอนกรีตบล็อกทุกส่วนผสมมีค่าการดูดซึมน้ำอย่างรวดเร็วในช่วงต้น หลังจากนั้น

การดูดซึมของน้ำมีแนวโน้มคงที่หลังจากแช่น้ำเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง ผลการทดสอบพบว่า การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร่วมกับสารละลายโซเดียมซิลิเกตสามารถลดค่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตบล็อก ที่ใช้วัสดุประสานจากเถาถ่านหินกระตุ้นด้วยด่าง เนื่องจากการเพิ่มของสารละลายโซเดียมซิลิเกตสามารถลดความพรุนภายในโครงสร้างของซีเมนต์เพสต์ที่ทำจากวัสดุประสานกระตุ้นด้วยด่าง ส่งผลต่อการดูดซึมของน้ำที่ลดลง (Liew *et al.*, 2012)



ภาพที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างการดูดซึมของน้ำและระยะเวลาในการแช่



ภาพที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดที่อายุ 28 วันและการดูดซึมของน้ำที่ระยะเวลา 168 ชั่วโมง

จากภาพที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและการดูดซึมของน้ำ พบว่า การดูดซึมของน้ำมีแนวโน้มลดลงเมื่อคอนกรีตมีกำลังอัดเพิ่มขึ้น เนื่องจากการพัฒนากำลังอัดที่เพิ่มขึ้นเกิดจากผลผลิตจากปฏิกิริยาซึ่งจับตัวกันเป็นโครงสร้างที่รับกำลังที่เพิ่มขึ้น นอกจากนั้นการเพิ่มผลผลิตยังส่งผลต่อความพรุนของโครงสร้างทางจุลภาพที่ลดลง การที่ช่องว่างหรือความพรุนภายในเนื้อของซีเมนต์เพสต์ลดลงแสดงให้เห็นถึงความหนาแน่นของเนื้อซีเมนต์เพสต์

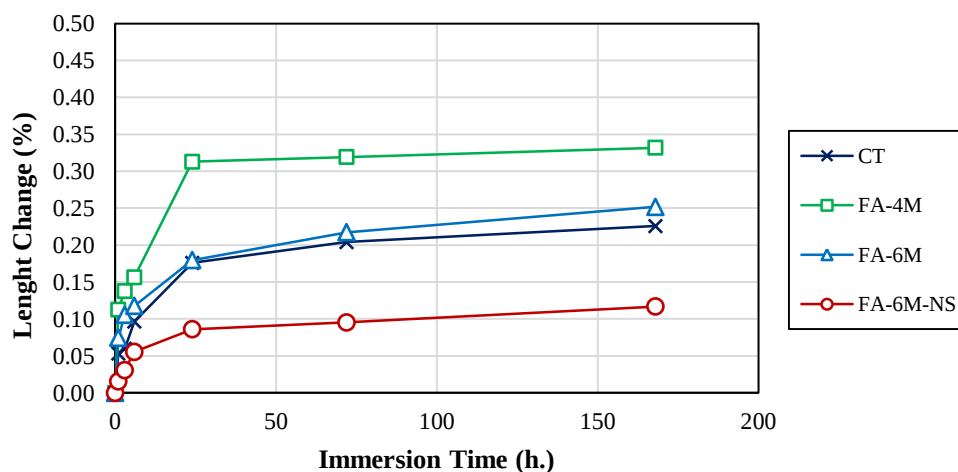
เพิ่มขึ้นและส่งผลให้มีอัตราการซึมผ่านของน้ำลดลง (Pangdaeng *et al.*, 2014) โดยจากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าผลของความทึบน้ำของวัสดุประสานกระดูกด้วยด่างขึ้นอยู่กับกำลังอัดของคอนกรีตเช่นเดียวกับคอนกรีตที่ใช้วัสดุประสานจากปูนซีเมนต์ เมื่อพิจารณาผลของการดูดซึมน้ำของคอนกรีตบล็อกที่ใช้วัสดุประสานจากเถาถ่านหินกระดูกด้วยด่างในงานวิจัยนี้ เปรียบเทียบกับคอนกรีตบล็อกที่ใช้วัสดุประสานจากเถาถ่านหินและกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (Namarak *et al.*, 2018)

และทำจากเถาขานอ้อยและกากเคลเซียมคาร์ไบด์ (Abdulmatin *et al.*, 2019) ซึ่งไม่มีปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน พบว่า มีค่าร้อยละการดูดซึมน้ำลดลงตามกำลังอัดที่เพิ่มขึ้นและผลการทดสอบมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับผลการทดสอบจากงานวิจัยนี้

4. อัตราการเปลี่ยนแปลงความยาวเนื่องจากการดูดซึมน้ำ

ผลการเปลี่ยนแปลงความยาวของคอนกรีตบล็อกเนื่องจากการดูดซึมน้ำแสดงดังภาพที่ 5 พบว่า คอนกรีตบล็อกที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานมีค่าการเปลี่ยนแปลงของความยาวเท่ากับร้อยละ 0.23 หลังจากแช่น้ำเป็นระยะเวลา 168 ชั่วโมง ส่วนกลุ่มของคอนกรีตบล็อกที่ทำจากวัสดุประสานกระตุ้นด้วยค่าต่างมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 0.12 ถึง 0.33 หลังจากแช่น้ำเป็นระยะเวลา 168 ชั่วโมง ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นมากขึ้นและการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร่วมกับสารละลาย

โซเดียมซิลิเกต ส่งผลต่อการแปลงเปลี่ยนของความยาวที่น้อยลง ผลการทดสอบมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับการทดสอบของ Matalkah and Soroushian (2018) ซึ่งศึกษาการเปลี่ยนแปลงของความยาวของมอร์ตาร์ที่แช่น้ำปูนขาวอิมตัว พบว่า มอร์ตาร์ที่ทำจากวัสดุประสานกระตุ้นด้วยค่าต่างมีการขยายตัวต่ำกว่ามอร์ตาร์ที่ใช้วัสดุประสานจากปูนซีเมนต์ นอกจากนั้นเห็นได้ว่า การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร่วมกับสารละลายโซเดียมซิลิเกต (FA-6M-NS) สามารถลดการเปลี่ยนแปลงของความยาวอย่างเห็นได้ชัด โดยการเพิ่มสารละลายโซเดียมซิลิเกตในส่วนผสมของวัสดุประสานกระตุ้นด้วยค่าต่างเป็นการเพิ่มอัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ ส่วนผสมซึ่งมีผลต่อการเพิ่มเสถียรภาพของโครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุประสาน ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรที่ลดลง (Lee *et al.*, 2020; Abdel-Gawwad *et al.*, 2020)



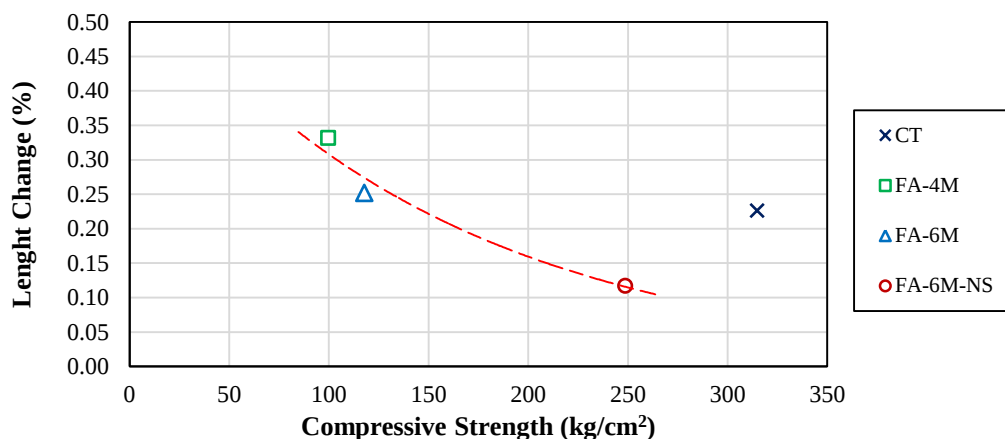
ภาพที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงความยาวเนื่องจากการดูดซึมน้ำและระยะเวลาในการแช่

จากความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและการเปลี่ยนแปลงของความยาวเมื่อแช่น้ำซึ่งแสดงในภาพที่ 6 เห็นได้ชัดเจนว่าคอนกรีตบล็อกที่ใช้วัสดุประสานกระตุ้นด้วยค่าต่างที่ใช้เถาขานอ้อยทั้งที่ใช้สารละลาย

โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นต่างๆ และการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร่วมกับสารละลายโซเดียมซิลิเกตเป็นสารละลายค่าต่าง มีค่าการเปลี่ยนแปลงของความยาวลดลงเมื่อคอนกรีตมีกำลังอัดเพิ่มขึ้น

เนื่องจากการที่คอนกรีตบล็อกมีกำลังอัดมากขึ้นเป็นผลมาจากการจับตัวของโครงสร้างหรือการยึดโยงกันของวัสดุเชื่อมประสานที่ดี โครงสร้างมีความแน่นขึ้น

ส่งผลต่อความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนแปลงของความยาวหรือปริมาตรที่ดีขึ้น (Ryu *et al.*, 2013; Abdel-Gawwad *et al.*, 2020)



ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดที่อายุ 28 วัน และการเปลี่ยนแปลงความยาวเนื่องจากการดูดซึมน้ำที่ระยะเวลา 168 ชั่วโมง

5. ผลของการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ตารางที่ 3 แสดงปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของวัสดุแต่ละชนิด (Turner and Collins, 2013) โดยแสดงค่าปริมาณของการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นในหน่วยกิโลกรัมต่อปริมาณวัสดุ 1 กิโลกรัม พบว่า ปูนซีเมนต์มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณที่สูงถึง 0.9 ตันต่อการผลิตปูนซีเมนต์หนึ่งตัน โดยมาจากกระบวนการสลายตัวของหินปูน และการใช้ความร้อนในเตาเผาปูนซีเมนต์ หากเปรียบเทียบกับเถาถ่านหินที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากการใช้ถ่านหินในการผลิตกระแสไฟฟ้า การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากวัตถุดิบดังกล่าวจึงพิจารณาเป็นศูนย์ แต่เถาถ่านหินยังมีค่าการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์บางส่วน ซึ่งมาจากการใช้พลังงานในกระบวนการคักจับเถาถ่านหิน จากนั้นนำมาคำนวณค่าประมาณของปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มาจากวัสดุประสานที่ใช้ในแต่ละส่วนผสมต่อการผลิตคอนกรีตบล็อก 1 ลูกบาศก์เมตรเปรียบเทียบกับ

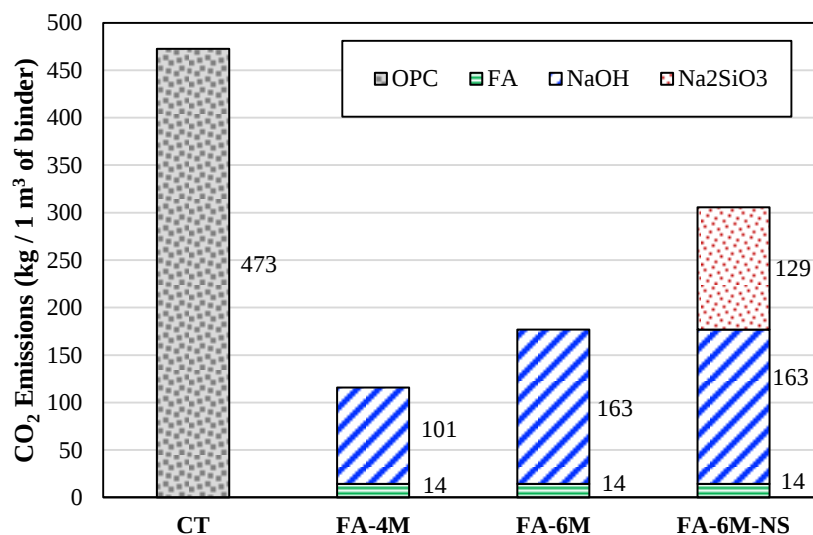
ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน ซึ่งใช้วัสดุประสานเท่ากับ 525 กิโลกรัมต่อผลิตคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร โดยผลการเปรียบเทียบแสดงในภาพที่ 7 พบว่า คอนกรีตบล็อกที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานมีปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 473 กิโลกรัมต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร ส่วนกลุ่มของคอนกรีตบล็อกที่ใช้วัสดุประสานที่ทำจากเถาถ่านหิน กระตุ้นด้วยค่าสามารถลดปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้อย่างมาก โดยส่วนผสม FA-4M, FA-6M และ FA-6M-NS มีปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 116, 177 และ 306 กิโลกรัมต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ โดยการใช้วัสดุประสานจากเถาถ่านหินและใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารกระตุ้นกำลัง (คอนกรีตบล็อก FA-4M, FA-6M) สามารถลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้สูงถึงร้อยละ 62 - 75 เมื่อเทียบกับวัสดุประสานที่ทำจากปูนซีเมนต์ แม้ว่าการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร่วมกับสารละลาย

โซเดียมซิลิเกต (คอนกรีตบล็อก FA-6M-NS) ส่งผลให้มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น แต่ยังคงมีผลรวมของปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์น้อยกว่าคอนกรีตบล็อกที่ใช้ปูนซีเมนต์ ซึ่งยังคงสามารถลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ถึงร้อยละ 35 เมื่อเทียบกับวัสดุประสานที่ทำจากปูนซีเมนต์ แสดงให้เห็นว่าการใช้วัสดุประสานจากเถ้าถ่านหินกระตุ้นด้วยด่างมีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและยังอาจช่วยลดปัญหาการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่

บรรยากาศเนื่องจากอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ อย่างไรก็ตาม ในงานวิจัยนี้ทำการเปรียบเทียบเฉพาะการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มาจากวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตคอนกรีตบล็อก ได้แก่ เถ้าถ่านหิน สารละลายด่างและปูนซีเมนต์ การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ยังเกิดขึ้นได้จากปัจจัยอื่นๆ เช่น การขนส่ง ซึ่งส่งผลให้ค่าการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากวัสดุทั้งสองอาจมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะทางในการขนส่ง

ตารางที่ 3 ปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Turner and Collins, 2013)

Material	CO ₂ Emissions (kg CO ₂ -e per kg of material weight)
OPC	0.900
FA	0.027
NaOH	1.915
Na ₂ SiO ₃	1.514



ภาพที่ 7 ปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของแต่ละส่วนผสม

สรุป

1. ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อการพัฒนากำลังอัดที่เพิ่มขึ้นของบล็อกคอนกรีตที่ทำเถ้าถ่านหิน และการ

ใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกตส่งผลอย่างมากต่อการพัฒนากำลังอัด ซึ่งเห็นว่า ตัวอย่างคอนกรีตบล็อกที่ใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกตร่วมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ (คอนกรีต F-6M-NS) พบว่ามีกำลังอัดเท่ากับ

152, 169 และ 249 กก/ชม² ที่อายุ 7, 14 และ 28 วัน ตามลำดับ

2. จากการทดสอบหาค่าการดูดซึมน้ำ พบว่า คอนกรีตบล็อกที่ทำจากเถ้าถ่านหินกระชอนด้วยค่าอยู่ในช่วงระหว่างร้อยละ 9.4 - 10.1 ขณะที่ คอนกรีตบล็อกที่ใช้ปูนซีเมนต์มีค่าการดูดซึมของน้ำ เท่ากับร้อยละ 6.8 นอกจากนั้น พบว่า อัตราการดูดซึมน้ำของคอนกรีตบล็อกขึ้นอยู่กับกำลังอัดของคอนกรีต กล่าวคือ การดูดซึมของน้ำจะมีค่าลดลงเมื่อคอนกรีตมีกำลังอัดเพิ่มขึ้น

3. จากการทดสอบการเปลี่ยนแปลงความยาวของคอนกรีตบล็อกเนื่องจากการดูดซึมของน้ำ พบว่า คอนกรีตบล็อกที่ใช้เถ้าถ่านหินกระชอนด้วยค่าการเปลี่ยนแปลงของความยาวมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 0.12 ถึง 0.33 หลังจากแช่เป็นระยะเวลา 168 ชั่วโมง และคอนกรีตบล็อกที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานมีค่าการเปลี่ยนแปลงของความยาว เท่ากับร้อยละ 0.23 หลังจากแช่เป็นระยะเวลา 168 ชั่วโมง

4. เมื่อพิจารณาผลของการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากการใช้วัสดุประสานแต่ละชนิด พบว่า คอนกรีตบล็อกที่ทำจากเถ้าถ่านหินกระชอนด้วยค่าทุกส่วนผสมมีปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์น้อยกว่าการใช้วัสดุประสานจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์อย่างเห็นได้ชัดเจน

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ภายใต้เงินงบประมาณเงินรายได้ พ.ศ. 2563 ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ที่ได้อำนวยความสะดวก ในการใช้พื้นที่และเครื่องมือต่างๆ สำหรับ

การศึกษาวิจัย นอกจากนั้นขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์

เอกสารอ้างอิง

- Abdel-Gawwad, H.A., Mohammed, M.S. and Zakey, S.E. 2020. Preparation, performance, and stability of alkali-activated-concrete waste-lead-bearing sludge composites. **Journal of Cleaner Production** 259: 120924.
- Abdulmatin, A., Tangchirapat, W. and Jaturapitakkul, C. 2019. Environmentally friendly interlocking concrete paving block containing new cementing material and recycled concrete aggregate. **European Journal of Environmental and Civil Engineering** 23(12): 1467-1484.
- ASTM C618. 2019. **Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete**. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.
- Dueramae, S., Tangchirapat, W., Sukontasukkul, P., Chindaprasirt, P. and Jaturapitakkul, C. 2019. Investigation of compressive strength and microstructures of activated cement free binder from fly ash-calcium carbide residue mixture. **Journal of Materials Research and Technology** 8(5): 4757-4765.
- Gavali, H.R., Bras, A., Faria, P. and Ralegaonkar, R.V. 2019. Development of sustainable alkali-activated bricks using industrial wastes. **Construction and Building Materials** 215: 180-191.

- Lee, W.H., Cheng, T.W., Lin, K.Y., Lin, K.L., Wu, C.C. and Tsai, C.T. 2020. Geopolymer technologies for stabilization of basic oxygen furnace slags and sustainable application as construction materials. **Sustainability** 12(12): 5002.
- Liew, Y.M., Kamarudin, H., Al Bakri, A.M., Bnhussain, M., Luqman, M., Nizar, I.K., Ruzaidi C.M. and Heah, C.Y. 2012. Optimization of solids-to-liquid and alkali activator ratios of calcined kaolin geopolymeric powder. **Construction and Building Materials** 37: 440-451.
- Matakah, F. and Soroushian, P. 2018. Synthesis and characterization of alkali aluminosilicate hydraulic cement that meets standard requirements for general use. **Construction and Building Materials** 158: 42-49.
- Mehta, P.K. 2009. Global concrete industry sustainability. **Concrete International** 33(2): 45-48.
- Nadoushan, M.J. and Ramezaniapour, A.A. 2016. The effect of type and concentration of activators on flowability and compressive strength of natural pozzolan and slag-based geopolymers. **Construction and Building Materials** 111: 337-347.
- Najimi, M. and Ghafoori, N. 2019. Engineering properties of natural pozzolan/slag based alkali-activated concrete. **Construction and Building Materials** 208: 46-62.
- Namarak, C., Bumrungsri, C., Tangchirapat, W. and Jaturapitakkul, C. 2018. Development of concrete paving blocks prepared from waste materials without portland cement. **Materials Science** 24(1): 92-99.
- Pangdaeng, S., Phoo-ngernkham, T., Sata, V. and Chindaprasit, P. 2014. Influence of curing conditions on properties of high calcium fly ash geopolymer containing Portland cement as additive. **Materials & Design** 53: 269-274.
- Puertas, F., Martínez-Ramírez, S., Alonso, S. and Vázquez, T. 2000. Alkali-activated fly ash/slag cements: Strength behavior and hydration products. **Cement and Concrete Research** 3(10): 1625-1632.
- Rifaai, Y., Yahia, A., Mostafa, A., Aggoun, S. and Kadri, E.H. 2019. Rheology of fly ash-based geopolymer: effect of NaOH concentration. **Construction and Building Materials** 223: 583-594.
- Ryu, G.S., Lee, Y.B., Koh, K.T. and Chung, Y.S. 2013. The mechanical properties of fly ash-based geopolymer concrete with alkaline activators. **Construction and Building Materials** 47: 409-418.
- Singh, G.B. and Subramaniam, K.V. 2017. Evaluation of sodium content and sodium hydroxide molarity on compressive strength of alkali activated low-calcium fly ash. **Cement and Concrete Composites** 81: 122-132.
- The Office of Industrial Economics. 2020. **Industrial Economic Summary Report 2020 and Industrial Economic Trend 2021**. Industrial Situations. Available Source: <http://www.oie.go.th/assets/portals/1/fileups/2/files/Industry%20conditions/annual2020trends2021.pdf>, September 10, 2021. (in Thai)

- TIS 57. 1990. **Hollow Loadbearing Concrete Masonry Units**. Thai industrial standards institute, Thailand. (in Thai)
- Turner, L.K. and Collins, F.G. 2013. Carbon dioxide equivalent ($\text{CO}_2\text{-e}$) emissions: A comparison between geopolymer and OPC cement concrete. **Construction and Building Materials** 43: 125-130.