การผลิตคอนกรีตบล็อคชนิดรับน้ำหนักจากจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าถ่านหิน

Production of Hollow Load-Bearing Concrete Masonry Blocks from Fly Ash-Based Geopolymer

Panha Huy Soklam Mov และ วิเชียร ชาลี*

Panha Huy Soklam Mov and Wichian Chalee*

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Burapha University

Received : 23 October 2014

Accepted : 26 April 2016

Published online : 24 May 2016

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของปริมาณมวลรวม ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH และอุณหภูมิบ่ม ต่อกำลังอัด และการดูดซึมน้ำของคอนกรีตบล็อคชนิดรับน้ำหนักจากจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าถ่านหิน โดยเตรียมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกจากเถ้าถ่านหินแม่เมาะ โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ซึ่งกำหนดอัตราส่วนโดยโมลาร์ระหว่าง SiO_2/Al_2O_3 คงที่ และใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 12 14 16 และ 18 โมลาร์ ใช้หินฝุ่นเป็นมวลรวมในส่วนผสมในอัตราส่วน เถ้าถ่านหิน:หินฝุ่น เท่ากับ 1:4 (S) 1:6 (M) และ 1:8 (L) โดยน้ำหนัก เตรียมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อคโดยใช้เครื่องอัดชนิดชินวา-แรม หลังจากนั้นบ่มจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อคในอากาศที่อุณหภูมิห้อง (25°ซ) และที่อุณหภูมิ 65°ซ เป็นเวลา 24 ชม. และบ่มต่อเนื่องที่อุณหภูมิห้องจนถึงอายุทดสอบ ทำการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตบล็อคที่อายุ 7 14 และ 28 วัน ตลอดจนทดสอบการดูดซึมน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อคที่อายุทดสอบ 28 วัน ผลการศึกษาพบว่า เมื่อความเข้มข้นของ NaOH และอุณหภูมิบ่มที่สูงขึ้น ส่งผลให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อคมากขึ้น การดูดซึมน้ำในจีโอพอลิเมอร์บล็อคลดลงเมื่อกำลังอัดสูงขึ้น ปริมาณมวลรวมในส่วนผสมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อคที่มากขึ้นไม่เกินปริมาณ M (เถ้าถ่านหิน:หินฝุ่น เท่ากับ 1:6) ให้กำลังอัดสูงขึ้น อย่างไรก็ตาม กำลังอัดมีแนวโน้มลดลงเมื่อใช้มวลรวมในส่วนผสมสูงถึงปริมาณ L (เถ้าถ่านหิน:หินฝุ่น เท่ากับ 1:8) นอกจากนั้นพบว่า อุณหภูมิบ่มที่สูงขึ้นมีประสิทธิภาพต่อการเพิ่มกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อคในกลุ่มที่ใช้ความเข้มข้นของ NaOH ต่ำ มากกว่าความเข้มข้นของ NaOH สูง

คำสำคัญ : เถ้าถ่านหิน จีโอพอลิเมอร์ คอนกรีตบล็อครับน้ำหนัก กำลังอัด ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH

***Corresponding author. E-mail:** wichian@buu.ac.th

Abstract

This research aimed to study the effects of aggregate content, sodium hydroxide (NaOH) concentrations and curing temperature on compressive strength and water absorption of geopolymer concrete block. The geopolymer concrete block were prepared from Mae Moh fly ash with sodium silicate (Na_2SiO_3) and sodium hydroxide (NaOH) solutions. The molar ratio of SiO_2/Al_2O_3 was kept constant and concentration of NaOH was varied at 12, 14, 16, and 18 molar. The ratio of 1:4 (S), 1:6 (M) and 1:8 (L) by weight of fly ash : dust limestone were used as an aggregate. The geopolymer concrete block were prepared by using the Cinva-Ram machine. The samples were air cured at room temperature (25^{o}C) and 65^{o}C for 24 hours and continuous curing until the age test in air. The geopolymer concrete block was tested for compressive strength at 7, 14, and 28 days. In addition, water absorption of geopolymer concrete block was tested at 28 days. The results showed that the compressive strength of geopolymer concrete block increase with the increase in NaOH concentration and curing temperature. The water absorption of geopolymer concrete block is low with the concrete of high compressive strength. An increase in amount of aggregate as high as M (the ratio of 1:6 by weight of fly ash : dust limestone) result in increased compressive strength; however, the compressive strength was found to decrease when using high amount of aggregate L (the ratio of 1:8 by weight of fly ash : dust limestone). In addition, high temperature curing has more effective on increasing of compressive strength in geopolymer concrete block with lower NaOH concentration than that with higher NaOH concentration.

Key words : fly ash, geopolymer, load-bearing concrete masonry blocks, compressive strength, sodium hydroxide concentration

บทนำ

คอนกรีตบล็อคเป็นวัสดุก่อที่ทำจากปูนซีเมนต์ผสมกับทราย หินขนาดเล็ก และน้ำ ผสมให้เข้ากันดี แล้วอัดในแบบเหล็กให้แน่นและบ่มในอากาศจนมีความแข็งตัวพอที่จะนำไปใช้ในการก่อสร้างได้ คอนกรีตบล็อคมีทั้งแบบรับน้ำหนัก (load-bearing concrete masonry blocks) และไม่รับน้ำหนัก (concrete masonry blocks) ซึ่งมาตรฐานของสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมของกระทรวงอุตสาหกรรม (มอก. 57-2533) ได้กำหนดให้คอนกรีตบล็อคชนิดรับน้ำหนักต้องสามารถรับน้ำหนักได้ไม่ต่ำกว่า 110 กก/ซม^2 ส่วนคอนกรีตบล็อคชนิดไม่รับน้ำหนักมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมของกระทรวงอุตสาหกรรม (มอก. 58-2533) ได้กำหนดให้รับน้ำหนักได้ไม่ต่ำกว่า 25 กก/ซม^2 การใช้งานคอนกรีตบล็อคในอุตสาหกรรมก่อสร้างมีมากขึ้น เนื่องจากเป็นวัสดุก่อที่ก่อสร้างได้ง่าย โดยคอนกรีตบล็อกชนิดรับน้ำหนักสามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้ในระดับหนึ่งเท่านั้น ดังนั้นการก่อสร้างใช้งานจึงเหมาะสมกับอาคารหรือสิ่งก่อสร้างขนาดเล็ก ซึ่งไม่มีความซับซ้อนของการรับแรงเชิงกลของโครงสร้าง

แนวคิดของการผลิตคอนกรีตโดยไม่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นส่วนผสม เริ่มจากการใช้สารปอซโซลานที่ประกอบด้วยซิลิกาและอะลูมินาเป็นหลัก เมื่อผสมกับด่างอัลคาไลไฮดรอกไซด์ สารละลายโซเดียมซิลิเกต และเร่งปฏิกิริยาด้วยความร้อน สามารถ

ก่อตัวและแข็งตัวให้มีกำลังรับแรงได้ สามารถใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสานเช่นเดียวกับซีเมนต์เพสต์ (Davidovits, 1991; Rattanasak *et al*., 2009 ; Chindaprasirt *et al*., 2009) ซึ่งสารจีโอพอลิเมอร์จะใช้หลักการของการทำปฏิกิริยาของซิลิกาและอะลูมินา ให้เป็นโมเลกุลลูกโซ่ในลักษณะของพอลิเมอร์ โดยการทำปฏิกิริยาลูกโซ่ที่เกิดจากซิลิกอนและอะลูมินาจะใช้สารละลายที่เป็นด่างสูง โดยใช้ความร้อนเป็นตัวกระตุ้น จะได้สารซีเมนต์ที่สามารถรับกำลังได้ และปัจจุบันพบว่า วัสดุจีโอพอลิเมอร์สามารถทำปฏิกิริยาสมบูรณ์ได้ในอุณหภูมิปกติ (Ambient Temperature) โดยไม่ต้องใช้ความร้อนในการช่วยเร่งปฏิกิริยาอีกต่อไป (Davidovits, 1991) โดยงานวิจัยที่ผ่านมา (Huajun *et al*., 2013 ; Gum Sung Ryu *et al*., 2013 ; Anurag *et al*., 2008 ; Chindaprasirt *et al*., 2009) ได้ศึกษาถึงปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุจีโอพอลิเมอร์ เช่น ลักษณะของการบ่ม ความเข้มข้นของด่าง และชนิดของวัสดุปอซโซลาน เป็นต้น ซึ่งผลการศึกษาโดยภาพรวม พบว่าการใช้ด่างที่มีความเข้มข้นสูงขึ้นสามารถชะเอาซิลิกาและอะลูมินาจากวัสดุปอซโซลานได้ดี และส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุจีโอพอลิเมอร์ที่ดีขึ้น ตลอดจนการบ่มวัสดุจีโอพอลิเมอร์ในอุณหภูมิที่สูงขึ้นไม่เกิน 90°ซ เป็นเวลาไม่เกิน 48 ชม. ก็ส่งผลดีต่อการรับแรงเชิงกลของวัสดุจีโอพอลิเมอร์อีกด้วย

สำหรับประเทศไทยยังไม่มีการใช้งานคอนกรีตที่ใช้จีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุประสานในอุตสาหกรรมก่อสร้าง ทั้งนี้เนื่องจากขาดความมั่นใจในการนำมาใช้งาน เพราะมีฐานข้อมูลที่ได้จากการศึกษาวิจัยที่น้อยเกินไป และยังไม่เกิดปัญหาขาดแคลนปูนซีเมนต์ อย่างไรก็ตามแนวการส่งเสริมเพื่อให้เกิดการใช้งานอย่างจริงจังในอุตสาหกรรมก่อสร้าง ควรเริ่มจากการศึกษาข้อมูลที่เป็นการสนับสนุนและเพิ่มความมั่นใจในการใช้งานให้มากขึ้น โดยเริ่มจากการใช้ในงานก่อสร้างคอนกรีตที่มีความซับซ้อนไม่มาก และมีลักษณะการรับแรงเชิงกลที่ไม่เสี่ยงต่อการวิบัติและก่อให้เกิดอันตราย เช่น คอนกรีตบล็อกหรือวัสดุงานก่อผนังหรือโครงสร้างง่ายๆ เป็นต้น ดังนั้นการศึกษาครั้งนี้ จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการผลิตจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อคชนิดรับน้ำหนัก (load-bearing concrete masonry blocks) โดยไม่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นส่วนผสม แต่ได้ใช้เถ้าถ่านหินที่เป็นผลพลอยได้จากการเผาถ่านหินในโรงงานผลิตไฟฟ้าในการทำวัสดุประสานแทน โดยมุ่งประเด็นไปที่ผลของปริมาณของมวลรวมหยาบ อุณหภูมิที่ใช้บ่มและความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังรับแรงอัด และการดูดน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อค เพื่อเพิ่มฐานข้อมูลการวิจัยที่น่าเชื่อถือประกอบการใช้งานให้มั่นใจยิ่งขึ้น

วิธีดำเนินการวิจัย

วัสดุ

วัสดุประสานได้ใช้เถ้าถ่านหินที่ได้โดยตรงจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ ซึ่งมีความถ่วงจำเพาะ เท่ากับ 2.23 มีอนุภาคที่ค้างตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 32 และอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ASTM C 618 ที่กำหนดไว้ไม่เกินร้อยละ 34 โดยน้ำหนัก มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่ 30.4 ไมครอน สำหรับองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหินแม่เมาะ มีผลรวมของสารประกอบหลัก SiO_2 Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เท่ากับร้อยละ 70.91 และ มีค่า LOI ร้อยละ 0.11 ซึ่งจัดเป็นเถ้าถ่านหิน Class F ตามมาตรฐาน ASTM C 618 โดยองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหินแสดงดังตารางที่ 1 สารละลายที่ใช้ในการเตรียมจีโอพอลิเมอร์เพื่อเป็นวัสดุประสานในคอนกรีตบล็อคประกอบด้วย สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ซึ่งอัตราส่วน SiO_2 ต่อ Na_2O เท่ากับ 3.4 โดยน้ำหนัก ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.36 ที่อุณหภูมิ 30°ซ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เข้มข้น 12, 14, 16 และ 18 โมลาร์ มวลรวมที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ใช้หินฝุ่นที่มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.67 การดูดซึมน้ำของหินฝุ่นที่ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C127 เท่ากับร้อยละ 9.58 และค่าโมดูลัสความละเอียดของหินฝุ่นเท่ากับ 2.97

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหิน

องค์ประกอบทางเคมี (%)	เถ้าถ่านหิน
Silicon Dioxide, SiO_2	34.10
Aluminum Oxide, Al_2O_3	19.90
Iron Oxide, Fe_2O_3	16.91
Calcium Oxide, CaO	18.75
Magnesium Oxide, MgO	-
Sodium Oxide, Na_2O	0.69
Potassium Oxide, K_2O	2.38
Sulfur Trioxide, SO_3	2.21
Loss On Ignition, LOI	0.11

การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบ

งานวิจัยนี้ จะศึกษาการผลิตคอนกรีตบล็อคชนิดรับน้ำหนักจากวัสดุจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าถ่านหิน โดยเตรียมจีโอพอลิเมอร์เพสต์จากเถ้าถ่านหินแม่เมาะ โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ซึ่งกำหนดอัตราส่วนโดยโมลาร์ระหว่าง SiO_2/Al_2O_3 คงที่ และใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 12 14 16 และ 18 โมลาร์ และใช้หินฝุ่นเป็นมวลรวมในสัดส่วนที่ต่างกัน 3 ขนาด โดยใช้อัตราส่วน เถ้าถ่านหิน:หินฝุ่น เท่ากับ 1:4(S) 1:6(M) และ 1:8(L) โดยน้ำหนัก โดยมีส่วนผสมทั้งหมด 12 ส่วนผสมตามตารางที่ 2 ทำการผสมสารโซเดียมไฮดรอกไซด์กับเถ้าถ่านหินทิ้งไว้เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นผสมสารละลายโซเดียมซิลิเกตและหินฝุ่นตามส่วนผสมดังแสดงในตารางที่ 2 คลุกเคล้าส่วนผสมทั้งหมดให้เข้ากัน ก่อนเทลงในแบบหล่อของเครื่องอัดคอนกรีตบล็อคชนิดซินวาแรมในปริมาณที่เท่ากันทุกส่วนผสม ทำการอัดจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อคโดยใช้เครื่องอัดชนิดซินวาแรมดังภาพที่ 1(ก) และบ่มจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อคในอากาศที่อุณหภูมิห้อง (25°ซ)และที่อุณหภูมิ 65 °ซ เป็นเวลา 24 ชม. จากนั้นใช้พลาสติกใสพันรอบไว้และบ่มต่อเนื่องที่อุณหภูมิห้องจนถึงอายุทดสอบ

การทดสอบกำลังอัด

เมื่อครบกำหนดทดสอบทำการตัดตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อก เป็นทรงลูกบาศก์ขนาด 50x50x50 มม^3 ดังภาพที่ 1(ข) เพื่อใช้ทดสอบกำลังอัด (เฉลี่ยจาก 3 ก้อน) ที่อายุ 7 14 และ 28 วัน

ทดสอบการดูดซึมน้ำ

ในการทดสอบการดูดซึมน้ำ (absorption test) ตามมาตรฐาน ASTM C642-97 ได้ตัดตัวอย่างคอนกรีตบล็อค ให้มีขนาด 50 x 50 x 50 มม.^{3} นำตัวอย่างคอนกรีตบล็อคเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 100 – 110 °ซ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนักตัวอย่างและแช่ตัวอย่างคอนกรีตบล็อคให้จมอยู่ในน้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วใช้ผ้าเช็ดให้แห้งโดยรอบอย่างเร็ว และชั่ง

น้ำหนัก ภายใน 5 นาที คำนวณหาร้อยละการดูดซึมน้ำของคอนกรีตบล็อค จากน้ำหนักตัวอย่างคอนกรีตบล็อคหลังจากแช่น้ำ 24 ชั่วโมง ลบด้วยน้ำหนักคอนกรีตบล็อคที่อบแห้งหารด้วยน้ำหนักคอนกรีตบล็อคที่อบแห้งทั้งหมดคูณด้วย 100 โดยทดสอบหาร้อยละการดูดซึมน้ำที่อายุ 28 วัน

ตารางที่ 2 ส่วนผสมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อค

ส่วนผสม	ส่วนผสมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อค						ความเข้มข้นของ NaOH (โมลาร์)
	เถ้าถ่านหิน (กรัม)	หินฝุ่น (กรัม)			NaOH (กรัม)	$Na_2O:SiO_3$ (กรัม)	
		เถ้าถ่านหิน : หินฝุ่น					
		1:4	1:6	1:8			
12M-S	1544	6176	0	0	336	668	12
12M-M	1544	0	9264	0	336	668	12
12M-L	1544	0	0	12352	336	668	12
14M-S	1544	6176	0	0	336	668	14
14M-M	1544	0	9264	0	336	668	14
14M-L	1544	0	0	12352	336	668	14
16M-S	1544	6176	0	0	336	668	16
16M-M	1544	0	9264	0	336	668	16
16M-L	1544	0	0	12352	336	668	16
18M-S	1544	6176	0	0	336	668	18
18M-M	1544	0	9264	0	336	668	18
18M-L	1544	0	0	12352	336	668	18

ภาพที่ 1 การเตรียมตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อคโดย (ก) การอัดคอนกรีตบล็อค (ข) การตัดตัวอย่างเพื่อทดสอบกำลังอัด

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

การพัฒนากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อค

กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อคที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 12 14 16 และ 18 โมลาร์ ที่บ่มในอุณหภูมิห้อง และ บ่มในอุณหภูมิ 65°ซ ดังตารางที่ 3 พบว่า ทุกส่วนผสมมีการพัฒนากำลังอัดเพิ่มขึ้นตามระยะเวลา เช่น จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อคที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 12 โมลาร์ บ่มในอุณหภูมิห้อง และหินฝุ่นที่ปริมาณ S M และ L มีกำลังอัดที่อายุ 7 วัน เท่ากับ 114 198 และ 155 กก/ซม^2 ตามลำดับ และมีการพัฒนากำลังอัดเพิ่มขึ้นเป็น 214 268 และ 299 กก/ซม^2 ที่อายุ 28 วัน ตามลำดับ ซึ่งแนวโน้มดังกล่าวนี้เป็นไปในทิศทางเดียวกับจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อค ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 12 โมลาร์ ที่บ่มในอุณหภูมิ 65°ซ และ หินฝุ่นที่ปริมาณ S M และ L มีกำลังอัดที่อายุ 7 วันเท่ากับ 227 271 และ 244 กก/ซม^2 และมีการพัฒนากำลังอัดเพิ่มขึ้นเป็น 360 353 และ 403 กก/ซม^2 ที่อายุคอนกรีต 28 วัน ตามลำดับ เมื่อพิจารณาการพัฒนากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อคในรูปของร้อยละของกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เทียบกับ 7 วัน โดยภาพรวมพบว่า การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงขึ้นไม่เกิน 16 โมลาร์ มีแนวโน้มให้ร้อยละของกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เทียบกับ 7 วัน มีแนวโน้มสูงขึ้น และมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยเมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงถึง 18 โมลาร์ เช่น จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อคที่ใช้ปริมาณมวลรวม M และใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 12 14 16 และ 18 โมลาร์ ที่บ่มในอุณหภูมิห้อง (25°ซ) และบ่มในอุณหภูมิ 65°ซ มีร้อยละของกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เทียบกับ 7 วัน เท่ากับ 135.4 176.7 207.5 193.2 และ 130.3 166.8 196.3 184.4 ตามลำดับ การที่กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อคมีการพัฒนาสูงขึ้นตามอายุการบ่ม เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรท์เซชั่น ปฏิกิริยานี้เป็นการทำปฏิกิริยาลูกโซ่ของ Si และ Al ซึ่งทำให้เกิดสมบัติในการยึดประสานกันระหว่างจีโอพอลิเมอร์และมวลรวมมากขึ้น ทำให้เกิดการอัดตัวเพิ่มความแข็งแรงคล้ายกับการก่อตัวและการแข็งตัวของซีเมนต์เพสต์ ทำให้จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อคมีกำลังอัดสูงขึ้น (Davidovits, 1991; Rattanasak *et al*., 2009 ; Chindaprasirt *et al*., 2009) เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิที่ใช้บ่มจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อคต่อการพัฒนากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อค พบว่า การบ่มจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อคในอุณหภูมิห้อง (25°ซ) มีการพัฒนากำลังอัดในรูปของร้อยละของกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เทียบกับ 7 วัน สูงกว่ากลุ่มที่บ่มในอุณหภูมิ 65°ซ และเป็นแนวโน้มเดียวกันทุกส่วนผสม ทั้งนี้เนื่องจากจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อคที่บ่มในตู้อบที่อุณหภูมิ 65°ซ เป็นการบ่มในช่วงอายุต้นๆ ซึ่งทำให้เร่งการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรท์เซชั่นในช่วงต้นให้เร็วขึ้น (Sarker *et al*., 2013 ; Chindaprasirt *et al*., 2013) จึงส่งผลให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อคกลุ่มนี้มีค่าสูงที่อายุต้นอยู่แล้ว และมีผลให้ร้อยละของกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เทียบกับ 7 วัน มีค่าต่ำกว่ากลุ่มที่บ่มในอุณหภูมิห้อง

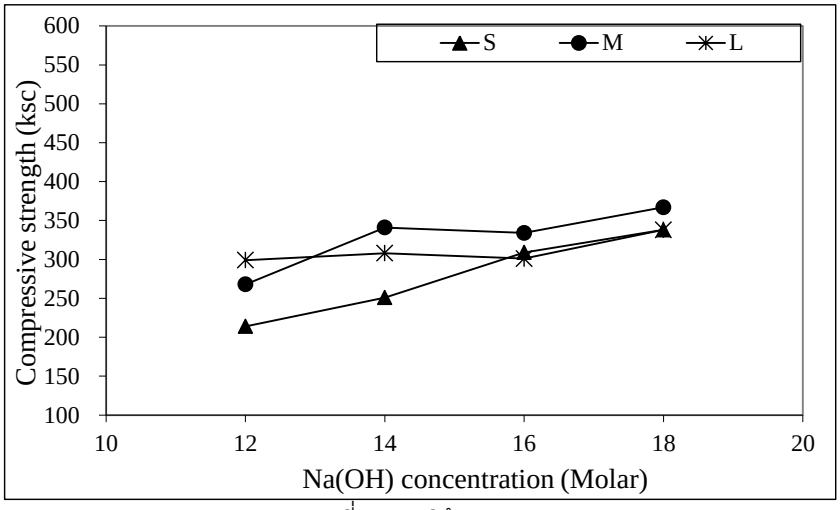
ตารางที่ 3 กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อค

ส่วนผสม	บ่มที่อุณหภูมิห้อง (25°ซ)				บ่มที่อุณหภูมิ 65°ซ			
	กำลังอัด (กก/ซม^2)			กำลังอัด 28 วัน เทียบ 7 วัน (ร้อยละ)	กำลังอัด (กก/ซม^2)			กำลังอัด 28 วัน เทียบ 7 วัน (ร้อยละ)
	7 วัน	14 วัน	28 วัน		7 วัน	14 วัน	28 วัน	
12 M-S	114	180	214	187.7	227	342	360	158.6
12M-M	198	250	268	135.4	271	330	353	130.3
12M-L	155	200	299	192.9	244	257	403	165.2
14M-S	126	189	251	199.2	239	352	380	159.0
14M-M	193	217	341	176.7	220	420	367	166.8
14M-L	153	168	308	201.3	264	350	413	156.4
16M-S	110	165	309	280.9	213	257	377	177.0
16M-M	161	200	334	207.5	219	263	430	196.3
16M-L	113	169	301	266.4	191	230	425	222.5
18M-S	102	214	338	331.4	151	223	358	237.1
18M-M	190	242	367	193.2	200	345	369	184.5
18M-L	160	208	338	211.3	220	355	414	188.2

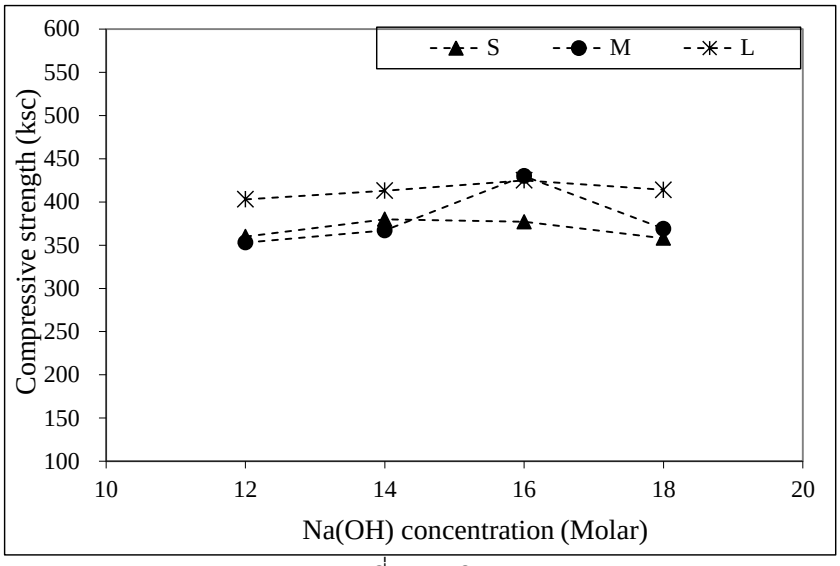
ผลของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อค

เมื่อพิจารณาผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกที่อายุ 28 วัน ที่บ่มในอุณหภูมิห้อง (25°ซ) และบ่มในอุณหภูมิ 65°ซ. ดังแสดงในภาพที่ 2(ก) และ 2(ข) ตามลำดับ พบว่า กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อคมีแนวโน้มสูงขึ้น ตามความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มากขึ้น เช่น จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อคที่ใช้มวลรวมปริมาณ S และใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 12 14 16 และ 18 โมลาร์ ที่บ่มในอุณหภูมิห้อง มีกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 214 251 309 และ 338 กก/ซม^2 ตามลำดับ การเพิ่มขึ้นของกำลังอัดในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อคที่ใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มากขึ้น อาจเป็นผลจากสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงขึ้น สามารถชะเอาซิลิกาและอะลูมินาจากเถ้าถ่านหินได้มากขึ้น ซึ่งทำให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรท์เซชั่นได้สมบูรณ์ และส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีกำลังอัดสูงขึ้นได้ (Hanjitsuwan *et al*., 2014 ; Palomo *et al*., 1999) อย่างไรก็ตาม การศึกษาที่ผ่านมา (อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์ และคณะ, 2549) พบว่า การชะเอาซิลิกาและอะลูมินาจากเถ้าถ่านหินมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สูง

(สูงมากกว่า 15 โมลาร์) ซึ่งอาจเป็นผลจากสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงมาก มีความหนืดมากขึ้นและส่งผลให้การชะเอาซิลิกาและอะลูมินาจากเถ้าถ่านหินได้ยากขึ้น นอกจากนั้นกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อคยังขึ้นกับการอัดตัวเชิงกลของบล็อคคอนกรีตที่ส่งผลให้วัสดุประสานและมวลรวมมีการอัดตัวกันแน่นขึ้น และส่งผลให้กำลังอัดคอนกรีตบล็อคสูงขึ้นอีกด้วย



ก) บ่มที่อุณหภูมิห้อง (25°ซ)



ข) บ่มที่อุณหภูมิ 65°ซ

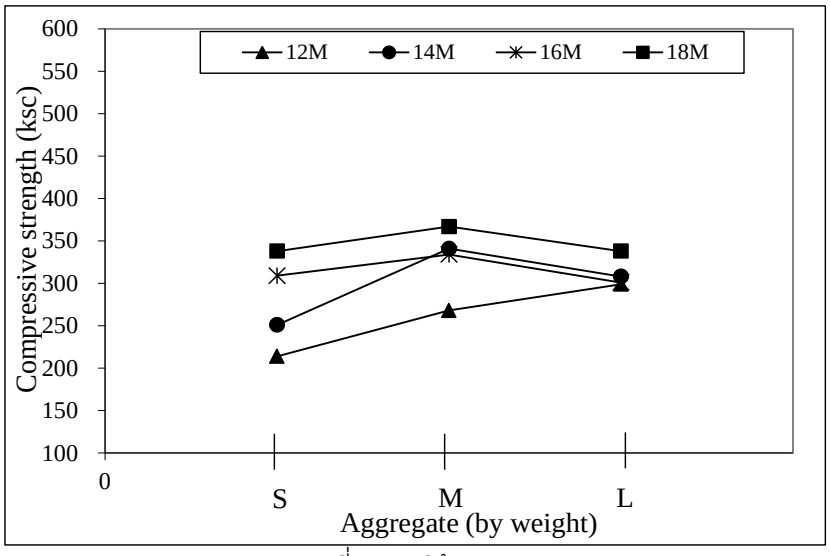
ภาพที่ 2 ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อคที่อายุ 28 วัน

ผลของปริมาณมวลรวมต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อค

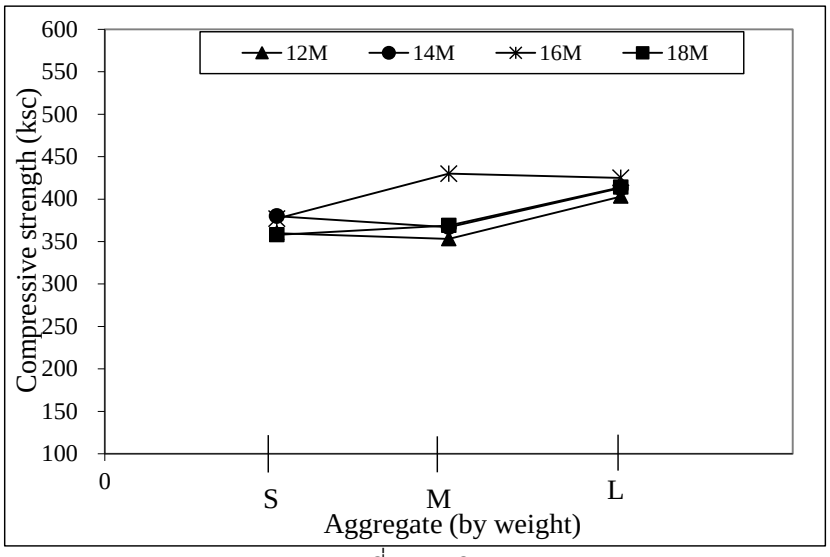
เมื่อพิจารณาผลของปริมาณมวลรวมต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อค ที่บ่มในอุณหภูมิห้องและบ่มในอุณหภูมิ 65°ซ ที่ อายุ 28 วัน ดังแสดงในภาพที่ 3(ก) และ 3(ข) ตามลำดับ เมื่อพิจารณากลุ่มที่บ่มในอุณหภูมิห้อง พบว่า จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อคที่ใช้มวลรวมปริมาณ M ส่งผลให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อคมีแนวโน้มสูงสุด และกำลัง

อัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อคมีแนวโน้มลดลงเมื่อใช้ปริมาณมวลรวมมากขึ้นเป็น L เช่น กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อคที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นเท่ากับ 14 โมลาร์ ที่อายุ 28 วัน เมื่อใช้ปริมาณของมวลรวม S M และ L ให้กำลังอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 251 341 และ 308 กก/ซม^2 ตามลำดับ ผลการศึกษาครั้งนี้เป็นที่น่าสังเกตว่า การใช้ปริมาณมวลรวมที่มากเกินไป ส่งผลให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อคต่ำลง น่าจะเป็นผลจากหินฝุ่นที่มากขึ้น ส่งผลให้ปริมาณของวัสดุประสาน ในส่วนผสมลดลง จึงมีผลให้การยึดเกาะระหว่างผิวของมวลรวมมีน้อย ความแข็งแรงของคอนกรีตบล็อคจึงต่ำลงด้วย ขณะเดียวกันการใช้ปริมาณมวลรวมที่ต่ำเกินไป อาจทำให้มวลรวมที่มีความแข็งแรงที่ช่วยรับแรงอัดมีปริมาณน้อยลง จึงทำให้การรับแรงของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อคลดลงได้ การรับแรงของคอนกรีตบล็อคเป็นไปในสองลักษณะคือ ผลของการอัดตัวของมวลรวม (packing effect) กับผลจากการยึดเกาะของวัสดุประสาน (Tangpagasit *et al*., 2005) ซึ่งขึ้นกับสมบัติของจีโอพอลิเมอร์เพสต์ ดังนั้น การใช้มวลรวมที่มีปริมาณสูงมากไปการยึดประสานก็ต่ำลง มีผลให้กำลังอัดต่ำลงได้ หรือมวลรวมที่มีปริมาณน้อยไปอาจส่งผลต่อการอัดตัวของคอนกรีตบล็อคที่มีมวลรวมน้อยไป ก็จะต้านการรับแรงเชิงกลได้ต่ำลง (Joseph and Mathew, 2012)

เมื่อพิจารณากลุ่มที่บ่มในอุณหภูมิ 65°ซ พบว่าการใช้มวลรวมที่มีปริมาณมากขึ้นมีแนวโน้ม ให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อคมีแนวโน้มสูงขึ้น ซึ่งอาจเป็นผลจากเพสต์ที่เกิดจากการบ่มที่อุณหภูมิสูงมีคุณภาพดี จึงส่งผลให้การยึดเกาะได้ดีขึ้น ถึงแม้มวลรวมจะมีปริมาณสูง นอกจากนี้ความแข็งแรงของคอนกรีตบล็อคไม่ได้มีปัญหาที่จุดยึดประสานระหว่างมวลรวมกับจีโอพอลิเมอร์เพสต์ ดังนั้นการเพิ่มปริมาณมวลรวมที่มีความแข็งแรง จะช่วยให้คอนกรีตบล็อคมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจเป็นผลจากการอัดตัวของมวลรวม



ก) บ่มที่อุณหภูมิห้อง (25°ซ)



ข) บ่มที่อุณหภูมิ 65°ซ

ภาพที่ 3 ผลของปริมาณมวลรวมต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อคที่อายุ 28 วัน

ผลของอุณหภูมิต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อค

เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิต่อกำลังอัดที่อายุ 28 วัน ของคอนกรีตบล็อคที่ใช้มวลรวมปริมาณ S M และ L ดังแสดงในภาพที่ 4(ก) 4(ข) และ 4(ค) ตามลำดับ พบว่า อุณหภูมิในการบ่มคอนกรีตบล็อคที่สูงขึ้น ส่งผลให้กำลังอัดที่อายุ 28 วัน มีค่าสูงขึ้น โดยมีแนวโน้มเหมือนกันในทุกความเข้มข้นของ NaOH และทุกกลุ่มของปริมาณมวลรวมหยาบที่ต่างกัน การที่อุณหภูมิสูงขึ้นมีผลต่อการเพิ่มของกำลังอัดในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อค เป็นผลจากจากการเพิ่มอุณหภูมิในการบ่มเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอไรเซชันให้เกิดปฏิกิริยาได้เร็วและสมบูรณ์มากขึ้น (Sarker *et al*., 2013 ; Chindaprasirt *et al.,* 2013)

พิจารณาประสิทธิภาพของอุณหภูมิบ่ม (effective curing temperature) ต่อกำลังอัดจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อค ตามสมการที่ (1)

$$E_T = \frac{[(C_{65} - C_R)x100]}{C_R} \qquad (1)$$

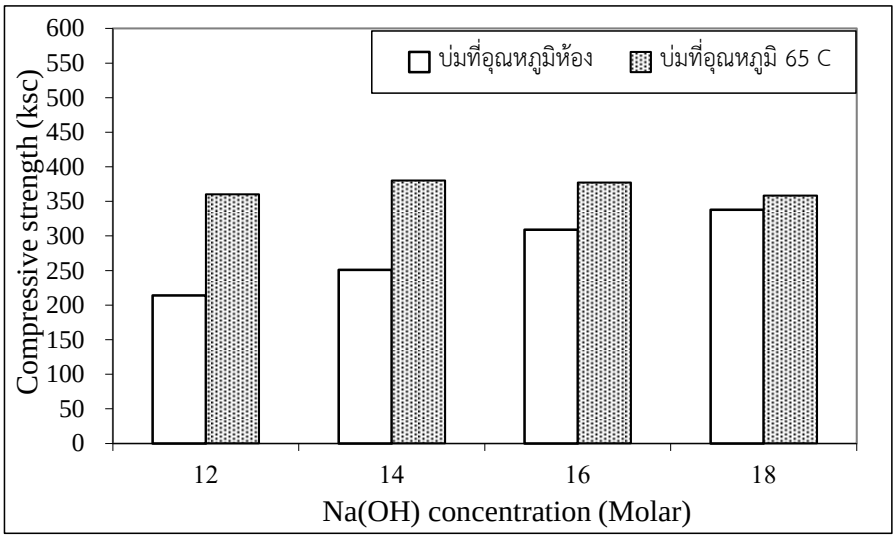
เมื่อ E_T = ประสิทธิภาพของอุณหภูมิบ่ม (ร้อยละ)

C_{65} = กำลังอัดจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อคที่บ่มในอุณหภูมิ 65 °ซ (กก/ซม^2)

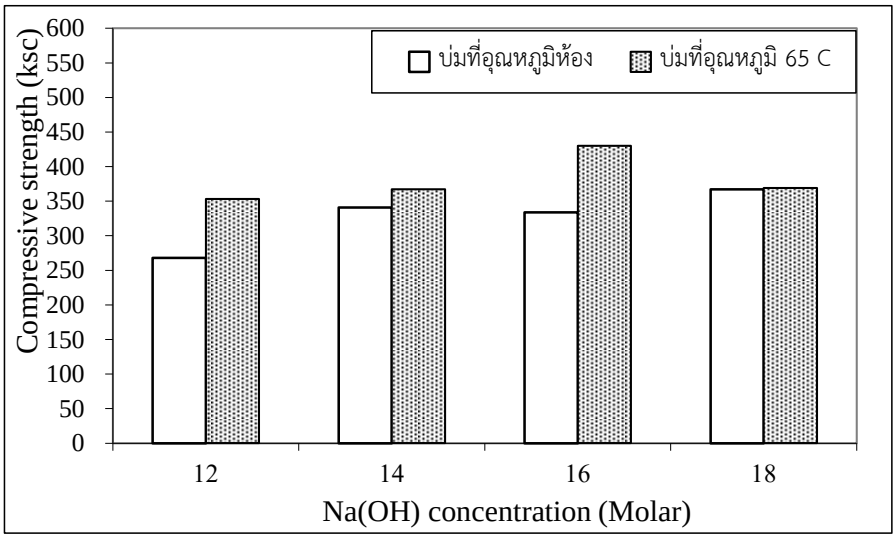
C_R = กำลังอัดจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อคที่บ่มในอุณหภูมิห้อง (25°ซ) (กก/ซม^2)

เมื่อพิจารณาผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ต่อประสิทธิภาพของอุณหภูมิบ่มในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อค ที่ใช้มวลรวมปริมาณ S ที่อายุ 7 และ 28 วัน ดังภาพที่ 5 พบว่า การใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์สูงขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพของอุณหภูมิที่ใช้บ่มจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อคลดลงอย่างชัดเจน โดยมีแนวโน้มเหมือนกันทั้งที่อายุ 7 และ 28 วัน เช่น จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อคที่ใช้มวลรวมปริมาณ S และใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 12 14 16 และ 18 โมลาร์ ให้ประสิทธิภาพของอุณหภูมิบ่มที่อายุ 28 วัน เท่ากับ ร้อยละ 68.2 51.6 22.0 และ 5.9 ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การใช้อุณหภูมิบ่มที่สูงขึ้น มีผลต่อการเพิ่มกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อค ในกลุ่มที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นต่ำมากกว่าความเข้มข้นสูง การที่อุณหภูมิบ่มสูงขึ้นมีประสิทธิภาพต่อการเพิ่มกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อค เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่ำลง น่าจะเป็นผลจากสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูง สามารถชะเอาซิลิกา และอะลูมินาจากเถ้าถ่านหินได้มาก และทำให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรท์เซชั่นที่ส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกมีกำลังอัดสูงได้ในอุณหภูมิห้องอยู่แล้ว (Hanjitsuwan *et al*., 2014 ; Palomo *et al*., 1999) โดยไม่จำเป็นต้องกระตุ้นปฏิกิริยาโดยใช้อุณหภูมิที่สูงขึ้น ส่วนกลุ่มที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นต่ำ จะมีปริมาณของซิลิกาและอะลูมินาที่ถูกชะจากเถ้าถ่านหินลดลง ดังนั้นการกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาพอลิคอนเด็นเซชั่นโดยใช้อุณหภูมิบ่มที่สูงขึ้น จึงมีผลต่อการเพิ่มกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อคกลุ่มนี้อย่างชัดเจน นอกจากนั้น การศึกษาครั้งนี้พบว่า การใช้อุณหภูมิบ่มที่สูงขึ้น มีประสิทธิภาพต่อการเพิ่มกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อคในช่วงอายุต้นๆ (7 วัน) มากกว่าอายุที่นานขึ้น (28 วัน) ทั้งนี้เนื่องจากการกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยาพอลิคอนเด็นเซชั่นโดยใช้อุณหภูมิบ่มที่สูงดังกล่าว เกิดขึ้นในช่วงอายุต้นๆ ของการบ่มจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อค (Chindaprasirt *et al*., 2013)

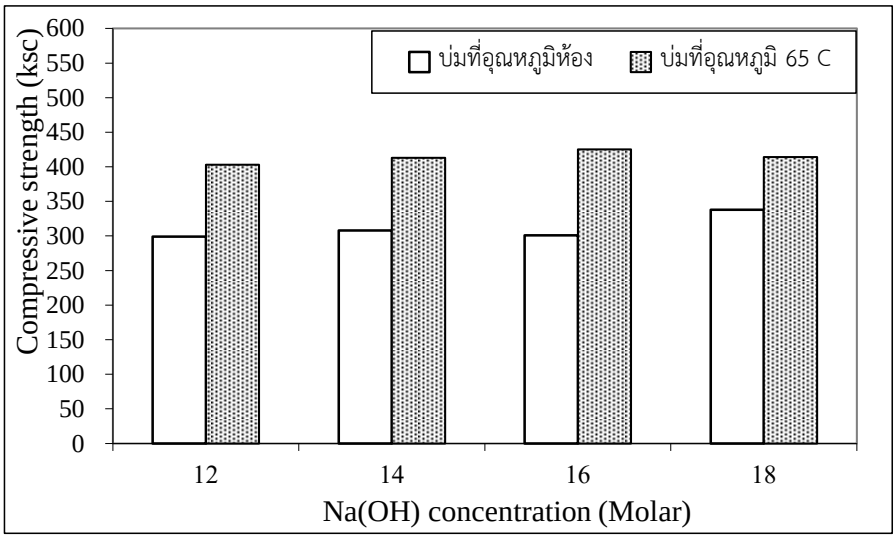
จากการศึกษาครั้งนี้พบว่า คอนกรีตบล็อคที่ผลิตจากวัสดุจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าถ่านหิน มีกำลังอัดต่ำสุดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 214 กก/ซม.^{2} ซึ่งสูงกว่ากำลังอัดของคอนกรีตบล็อคชนิดรับน้ำหนัก ตามมาตรฐาน มอก. 58-2533 ที่กำหนดให้คอนกรีตบล็อคชนิดรับน้ำหนักต้องมีกำลังอัดไม่น้อยกว่า 14 MPa (140 กก/ซม.^{2}) โดยแต่ละก้อนต้องมีกำลังรับแรงอัดไม่ต่ำกว่า 11 MPa (110 กก/ซม.^{2})



ก) ปริมาณมวลรวม S

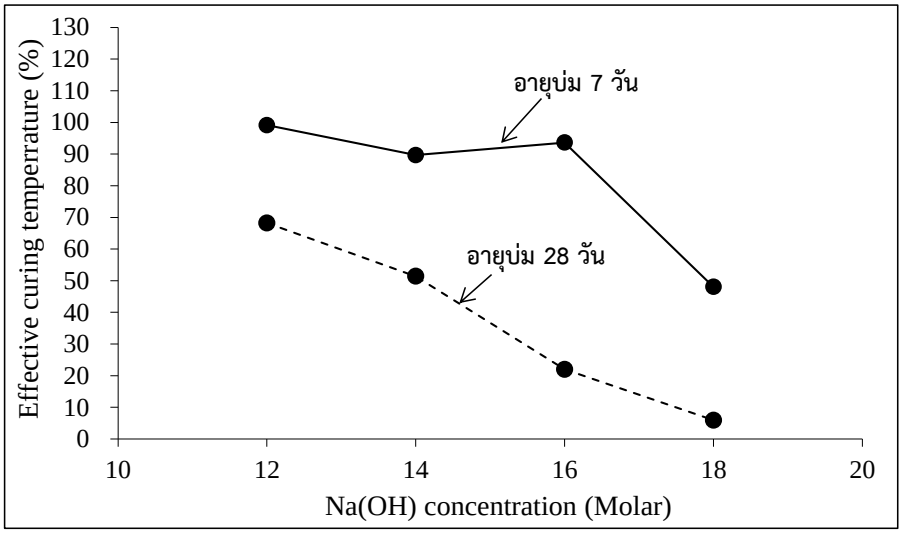


ข) ปริมาณมวลรวม M



ค) ปริมาณมวลรวม L

ภาพที่ 4 ผลของอุณหภูมิบ่มต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อคที่อายุ 28 วัน



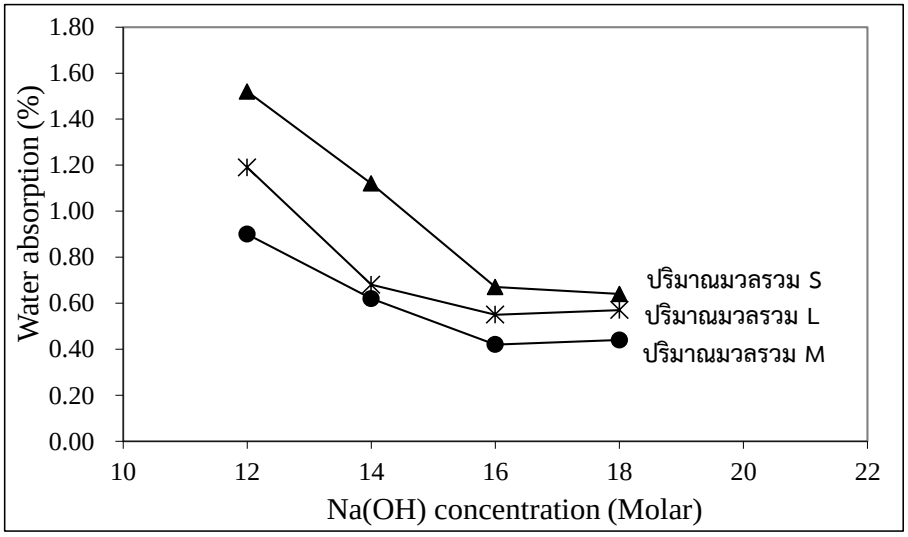
ภาพที่ 5 ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อประสิทธิภาพของอุณหภูมิบ่มในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อคที่ใช้มวลรวมปริมาณ S ที่อายุ 7 และ 28 วัน

การดูดซึมน้ำของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อค

เมื่อพิจารณาผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อการดูดซึมน้ำของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อค ในกลุ่มที่บ่มในอุณหภูมิห้องดังภาพที่ 6 พบว่า การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงขึ้น ส่งผลให้การดูดซึมน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อคต่ำลง และให้แนวโน้มในทิศทางเดียวกันในปริมาณหินฝุ่นทั้ง 3 กลุ่ม เช่น การใช้มวลรวมปริมาณ S ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อคที่ใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 12 14 16 และ 18 โมลาร์ ที่บ่มในอุณหภูมิห้องให้การดูดซึมน้ำเท่ากับร้อยละ 1.52 1.12 0.67 และ 0.64 ตามลำดับ ทั้งนี้เกิดจากจีโอพอลิเมอร์

คอนกรีตบล็อคกลุ่มที่ใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นต่ำ มีกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างจีโอพอลิเมอร์เพสต์กับมวลรวมต่ำกว่ากลุ่มที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูง โดยความเข้มข้นของ NaOH ที่สูงขึ้นส่งผลให้ชะเอาซิลิกาและอะลูมินาที่สามารถเข้าทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรท์เซชั่นได้ดี และทำให้มีการยึดเกาะที่ดี ส่งผลให้ความพรุนระหว่างเพสต์กับมวลรวมหยาบน้อยลง จึงทำให้ช่องว่างระหว่างมวลรวมลดลงด้วย จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อก จึงมีการดูดซึมน้ำต่ำลงด้วย

เมื่อพิจารณาผลของปริมาณมวลรวม S M และ L ต่อการดูดซึมน้ำของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกของกลุ่มที่บ่มในอุณหภูมิห้อง (ภาพที่ 6) พบว่า การเพิ่มปริมาณมวลรวมจาก S เป็น M มีแนวโน้มให้การดูดซึมน้ำลดลงและมีแนวโน้มสูงขึ้นอีกครั้งเมื่อเพิ่มปริมาณมวลรวมเป็น L เช่น จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อคที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 12 โมลาร์ และใช้หินฝุ่นปริมาณ S, M และ L หลังบ่มในอุณหภูมิห้องที่อายุ 28 วัน ให้การดูดซึมน้ำเท่ากับร้อยละ 1.52 0.90 และ 1.19 ตามลำดับ ผลดังกล่าวอาจเกิดจากการใช้มวลรวมที่มีปริมาณน้อย (S) ส่งผลให้ความพรุนของคอนกรีตบล็อคขึ้นกับจีโอพอลิเมอร์เพสต์ ตลอดจนช่องว่างระหว่างมวลรวมมีมากขึ้น จึงทำให้การดูดซึมน้ำมีค่าสูงและเป็นที่น่าสังเกตว่า การดูดซึมน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อคกลุ่มนี้ขึ้นกับความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ค่อนข้างชัดเจนกว่ากลุ่มอื่น แต่เมื่อใช้ปริมาณมวลรวมขึ้นเป็น M กลับพบว่า การดูดซึมน้ำต่ำลง จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อคทึบน้ำมากขึ้น ซึ่งอาจเกิดจากปริมาณมวลรวมดังกล่าวเป็นปริมาณที่เหมาะสมในการแทรกตัวและลดช่องว่างในมวลรวม ส่วนการใช้มวลรวมสูงขึ้นเป็น L พบว่า การดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ซึ่งเกิดจากปริมาณมวลรวมมากเกินไป ทำให้จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตเพสต์ลดลง จึงมีผลให้การดูดซึมสูงขึ้นตลอดจนมวลรวมอาจมีการดูดน้ำเองด้วย โดยผลการทดสอบการดูดซึมน้ำของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อคในครั้งนี้สอดคล้องกับกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อคดังที่กล่าวมาข้างต้น โดยกำลังอัดจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อคสูงขึ้นส่งผลให้การดูดซึมน้ำลดลง ทั้งนี้เป็นผลจากกำลังอัดที่มีค่าสูงขึ้น มีผลให้จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อคแน่นขึ้น ความพรุนน้อยลง จึงส่งผลให้การดูดซึมน้ำลดลงด้วย โดยคอนกรีตบล็อคที่มีกำลังอัดสูงและการดูดซึมน้ำต่ำ ถือว่ามีความเหมาะสมในการนำมาใช้งานได้ดีขึ้น



ภาพที่ 6 ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อการดูดซึมน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อคที่อายุ 28 วัน

สรุปผลการวิจัย

ผลการศึกษาสรุปได้ดังนี้

1. การใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สูงขึ้น ส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อคมีกำลังอัดเพิ่มขึ้นและการดูดซึมน้ำมีค่าลดลง
2. การใช้อัตราส่วนระหว่าง เถ้าถ่านหิน:หินฝุ่น เท่ากับ 1:6 โดยน้ำหนัก ส่งผลให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อคมีค่าสูงสุดทั้งกลุ่มที่บ่มในอุณหภูมิห้องและบ่มในอุณหภูมิ 65°ซ
3. การใช้อุณหภูมิในการบ่มสูงขึ้นส่งผลให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อคสูงขึ้น โดยอุณหภูมิบ่มที่สูงขึ้นมีประสิทธิภาพต่อการเพิ่มกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อคในกลุ่มที่ใช้ความเข้มข้นของ NaOH ต่ำ มากกว่าความเข้มข้นของ NaOH สูง
4. การศึกษาครั้งนี้พบว่า จีโอพอลิเมอร์ของคอนกรีตบล็อคที่ใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 18 โมลาร์ และอัตราส่วนระหว่าง เถ้าถ่านหิน:หินฝุ่น เท่ากับ 1:6 โดยน้ำหนัก ให้ผลดีต่อสมบัติจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อคชนิดรับน้ำหนักมากที่สุด เนื่องจากให้การรับแรงเชิงกลที่ดีควบคู่กับการดูดซึมน้ำต่ำ

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ ทุนสนับสนุนการวิจัยจาก สำนักบริหารโครงการส่งเสริมการวิจัยในอุดมศึกษาและพัฒนามหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2557 (HERP)

เอกสารอ้างอิง

Anurag, M., Deepika, C., Namrata, J., Manish, K., Nidhi, S., & Durga, D., (2008). Effect of concentration of alkali liquid and curing time on strength and water absorption of geopolymer concrete. *Eng Appl Sci, 3,* 14-18.

ASTM C618. (1997). Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, fly ash, natural pozzolan, pozzolans. *Annual Book of ASTM Standards; V. 04.01.*

ASTM C127-88. (2001). Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate. *Annual Book of ASTM Standards; V. 04.01.*

ASTM C642-97. (2001). Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete. *Annual Book of ASTM Standards; V. 04.01.*

Bakharev, T., (2005). Geopolymeric materials prepared using Class F fly ash and elevated temperature curing. *Cement and Concrete Research, 35,* 1224-1232.

Chindaprasirt, P., Chalee, W., Jaturapitakkul, C., & Rattanasak, U., (2009). Comparative study on the characteristics of fly ash and bottom ash geopolymers. *Waste Management, 29,* 539-543.

Chindaprasirt, P., Rattanasak, U., & Taebuanhuad, S., (2013). Resistance to acid and sulfate solutions of microwave-assisted high calcium fly ash geopolymer. *Materials and Structures, 46,* 375-381.

Davidovits, J., (1991). Geopolymer inorganic polymeric new materials. *J Therm Anal, 37,* 1633-1659.

Gum Sung Ryu, Young Bok Lee, Kyung Taek Koh, & Young Soo Chung., (2013). The mechanical properties of fly ash-based geopolymer concrete with alkaline activators. *Construction and Building Materials, 47,* 409-418.

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

Huajun Zhu, Zuhua Zhang, Fenggan Deng, & Yalong Cao., (2013). The effects of phase changes on the bonding property of geopolymer to hydrated cement. *Construction and Building Materials, 48,* 124-130.

Joseph, B., & Mathew, G., (2012). Influence of aggregate content on the behavior of fly ash based geopolymer concrete. *Scientia Iranica A 19, 1188–1194.*

Palomo, A., Grutzek, MW., & Blanco, MT., (1999). Fracture behaviour of heat cured fly ash based geopolymer concrete. *Cement and Concrete Research, 29,* 1323-1329.

Rattanasak, U., & Chindaprasirt, P., (2009). Influence of Na(OH) solution on the synthesis of fly ash geopolymer. *Miner Eng, 22,* 1073-1078.

Sarker, K., AHaque, R., & Ramgolam, K., (2013). Fracture behaviour of heat cured fly ash based geopolymer concrete. *Materials and Design, 44,* 580-586.

Tangpagasit, J., Cheerarot, R., Jaturapitakkul, C., & Kiattikomol, K., (2005). Packing effect and pozzolanic reaction of fly ash in mortar. *Construction and Building Materials, 35,* 1145-1151.

TIS 57-2533. (1990). Hollow load-bearing concrete masonry units. *Thai Industrial Standard Institute*, (7^{th}) Bangkok, (in Thai)

TIS 58-2533. (1990). Hollow non-load-bearing concrete masonry units. *Thai Industrial Standard Institute*, (7^{th}) Bangkok, (in Thai)

Rattanasak, U., Chalee, W., & Chindaprasirt, P., (2006). Study of Leaching of Lignite Fly Ash and Strength of Fly Ash Based-Geopolymer. *KMUTT Research and Development Journal*, *29*(4), 437-446. (in Thai)