บทความวิจัย

การประยุกต์ใช้จีโอพอลิเมอร์จากเถ้าแกลบในคอนกรีตบล็อกชนิดรับน้ำหนัก

เที่ยง ชีวะเกตุ และ วิเชียร ชาลี*
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 08 9791 5171 อีเมล: wichian@buu.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2018.09.005
รับเมื่อ 15 พฤษภาคม 2561 แก้ไขเมื่อ 25 มิถุนายน 2561 ตอบรับเมื่อ 3 สิงหาคม 2561 เผยแพร่ออนไลน์ 12 กันยายน 2561
© 2019 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของปริมาณมวลรวมความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และอุณหภูมิบ่มต่อกำลังอัด และการดูดซึมน้ำในคอนกรีตบล็อกชนิดรับน้ำหนักจากจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าแกลบจากโรงงานโดยตรง เตรียมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกจากจากเถ้าแกลบที่ไม่ผ่านการบดและเถ้าถ่านหิน (เถ้าแกลบ : เถ้าถ่านหิน เท่ากับ 50 : 50 โดยน้ำหนัก) สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 12, 14, 16 และ 18 โมลาร์ และใช้ปริมาณหินฝุ่นเป็นมวลรวมแทนที่ในอัตราส่วน (เถ้าแกลบผสมเถ้าถ่านหิน) : หินฝุ่น เท่ากับ 1 : 4, 1 : 6 และ 1 : 8 โดยน้ำหนัก หลังจากนั้นทำการอัดจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกในเครื่องอัดคอนกรีตบล็อก โดยบ่มจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกในอากาศที่อุณหภูมห้อง (25°ซ) และบ่มในตู้อบที่อุณหภูมิ 65°ซ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นบ่มในอากาศที่อุณหภูมิห้องจนถึงอายุทดสอบ โดยทดสอบกำลังอัดที่อายุ 7, 14, และ 28 วัน ตลอดจนทดสอบการดูดซึมน้ำที่อายุ 28 วัน ผลการศึกษาพบว่า การใช้ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่สูงขึ้น ส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกมีกำลังอัดสูงขึ้นและการดูดซึมน้ำมีค่าลดลง โดยเห็นผลชัดเจนในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกที่ใช้มวลรวมปริมาณต่ำมากกว่าปริมาณสูง การใช้มวลรวมผสมในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกในปริมาณที่มากขึ้น ส่งผลให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกลดลง ตลอดจนการใช้อุณหภูมิในการบ่ม 65°ซ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ส่งผลให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อก สูงกว่ากลุ่มที่บ่มในอุณหภูมิห้อง 25°ซ อย่างชัดเจน โดยอุณหภูมิบ่มที่สูงขึ้นมีประสิทธิภาพต่อการเพิ่มกำลังอัดในกลุ่มที่ใช้ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่ำ มากกว่าความเข้มข้นของสารละลาย NaOH สูง

คำสำคัญ: คอนกรีตบล็อกชนิดรับน้ำหนัก, เถ้าแกลบจากโรงงานโดยตรง, กำลังอัด, ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์, จีโอพอลิเมอร์

การอ้างอิงบทความ: เที่ยง ชีวะเกตุ และ วิเชียร ชาลี, "การประยุกต์ใช้จีโอพอลิเมอร์จากเถ้าแกลบในคอนกรีตบล็อกชนิดรับน้ำหนัก," *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, ปีที่ 29, ฉบับที่ 2, หน้า 199–210, เม.ย.–มิ.ย. 2562.

วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีที่ 29 ฉบับที่ 2 เม.ย.–มิ.ย. 2562
The Journal of KMUTNB., Vol. 29, No. 2, Apr.–Jun. 2019

Research Article

Utilization of Rice Husk Ash-based Geopolymer in Hollow Load-bearing Concrete Masonry Block

Tieng Cheewaket and Wichian Chalee*
Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, Burapha University, Chon Buri, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 08 9791 5171, E–mail: wichian@buu.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2018.09.005
Received 15 May 2018; Revised 25 June 2018; Accepted 3 August 2018; Published online: 12 September 2018
© 2019 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

This research aims to study the effects of aggregate content, Sodium Hydroxide (NaOH) concentration and curing temperature on compressive strength and water absorption of load-bearing geopolymer concrete blocks. Original coarse rice husk ash blended with fly ash at the percentage by weight of 50 : 50 was used as a binder. Sodium Silicate (Na_2SiO_3) and Sodium Hydroxide (NaOH) solutions were also mixed with the binder to produce geopolymer concrete blocks. NaOH solution concentrations were varied at 12, 14, 16, and 18 molars. Dust limestone was also used as an aggregate in the mixture at various weight ratios between the binder (rice husk ash blended with fly ash) and aggregate, ranging from 1 : 4, 1 : 6 and 1 : 8. The geopolymer concrete blocks were produced by the Cinva-Ram machine. The specimens were then arranged into two groups at the temperatures of 25°C (room temperature) and 65°C for the first 24-hour curing; then all the specimens were cured in room temperature until the testing ages. The geopolymer concrete block specimens were tested for compressive strength at 7, 14, and 28 days and its water absorption was tested at 28 days. The results showed that higher NaOH solution concentration led to higher compressive strength and lower water absorption of geopolymer concrete blocks. These effects were evidently found in geopolymer concrete blocks with low aggregate content than in those with high aggregate content. An Increase of aggregate content in the mixture also decreases compressive strength of geopolymer concrete blocks. In addition, geopolymer concrete blocks, which were cured at 65°C for 24 hours apparently yielded higher compressive strength than those cured at 25°C (room temperature). Besides, high curing temperature has a greater effect to increase compressive strength of geopolymer concrete blocks with lower NaOH concentration than their counterparts with higher NaOH concentration.

Keywords: Load-bearing Geopolymer Concrete Masonry Block, Original Rice Husk Ash, Compressive Strength, Sodium Hydroxide Concentration, Geopolymer

Please cite this article as: T. Cheewaket and W. Chalee, "Utilization of rice husk ash-based geopolymer in hollow load-bearing concrete masonry block," *The Journal of KMUTNB*, vol. 29, no. 2, pp. 199–210, Apr.–Jun. 2019 (in Thai).

1. บทนำ

เถ้าแกลบดำเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าที่ใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิง ซึ่งเป็นการเผาระบบปิด ลักษณะทางกายภาพของเถ้าแกลบมีขนาดและรูปร่างของอนุภาคไม่แน่นอน เป็นเหลี่ยมมุม มีผิวขรุขระ และมีความพรุนสูง อนุภาคมีรูโพรงอยู่ภายใน ซึ่งเป็นข้อด้อยของเถ้าแกลบในการนำมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลานในงานคอนกรีต อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบดำ พบว่า มีซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ประมาณร้อยละ 80–90 [1], [2] ซึ่งเป็นปริมาณที่สูงมาก และเป็นข้อเด่นที่ส่งผลดีต่อการนำมาใช้เพื่อเป็นวัสดุประสานในงานคอนกรีต การที่เถ้าแกลบมีอนุภาคหยาบ ดูดน้ำ และมีความพรุน ถือเป็นอุปสรรคสำคัญในการนำเถ้าแกลบมาใช้ในงานคอนกรีต เพราะถึงแม้จะมีองค์ประกอบทางเคมีที่ดี แต่การเกิดปฏิกิริยาที่ส่งผลให้วัสดุประสานมีการรับแรงได้ จะต้องมีสมบัติทางกายภาพที่ดีด้วย เช่น ความละเอียดสูง การดูดน้ำต่ำ ความพรุนต่ำ เป็นต้น การศึกษาที่ผ่านมา [3]–[5] พบว่า การบดเถ้าแกลบให้มีความละเอียดสูง สามารถใช้เป็นวัสดุประสานที่ให้กำลังกับคอนกรีตได้ดี ไม่ว่าจะอยู่ในรูปของวัสดุปอซโซลาน หรือวัสดุจีโอพอลิเมอร์ แต่การบดเถ้าแกลบให้มีความละเอียดสูง ก็ทำให้มีต้นทุนการผลิตที่สูงด้วย

แนวทางการศึกษาเพื่อนำเถ้าแกลบที่ได้จากโรงงานโดยตรงมาใช้ในงานก่อสร้าง ควรเริ่มจากวัสดุก่อสร้างที่ไม่ต้องการความแข็งแรงสูง เพื่อใช้ในงานก่อสร้างที่มีการรับแรงเชิงกลไม่ซับซ้อน ปัจจุบันมีการศึกษาวัสดุประสานเพื่อใช้เป็นวัสดุก่อสร้างโดยไม่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นส่วนผสมที่เรียกว่า วัสดุจีโอพอลิเมอร์ ซึ่งวัสดุดังกล่าวนี้ ได้ใช้สารปอซโซลานที่ประกอบด้วยซิลิกาและอะลูมินาเป็นหลัก มาผสมกับด่างอัลคาไล สารละลายโซเดียมซิลิเกต และเร่งปฏิกิริยาด้วยความร้อน สามารถก่อตัวและแข็งตัวให้มีกำลังรับแรงได้ สารปอซโซลานที่นิยมใช้กัน ได้แก่ เถ้าลอย และดินขาวเผา ซึ่งเริ่มมีการศึกษาโดยใช้สารตั้งต้นอื่นๆ ที่มีในประเทศมากขึ้น เช่น เถ้าชีวมวลที่เกิดจากการเผากากจากผลผลิตทางการเกษตร เพื่อใช้เป็นเชื้อพลิงในโรงงานอุตสาหกรรม เช่น เถ้าแกลบ เถ้าแกลบเปลือกไม้ เถ้าชานอ้อย เถ้าปาล์มน้ำมัน เป็นต้น การศึกษาที่ผ่านมา [6]–[8] พบว่า มีปัจจัยหลายอย่างที่ส่งผลต่อสมบัติของวัสดุประสานจากจีโอพอลิเมอร์ เช่น อุณหภูมิที่ใช้เร่งปฏิกิริยา ความเข้มข้นของด่างที่ใช้ชะเอาซิลิกาและอะลูมินา ปริมาณของเหลวต่อของแข็ง อัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินา ตลอดจนลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของวัสดุตั้งต้นที่ใช้ผลิตวัสดุจีโอพอลิเมอร์ เป็นต้น

การส่งเสริมการใช้งานวัสดุประสานจากจีโอพอลิเมอร์ในวัสดุก่อสร้างที่ทำได้ง่าย ไม่ซับซ้อน โดยเน้นที่วัสดุตั้งต้นที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมที่หาได้ง่าย ก็จะเป็นประโยชน์อย่างมาก ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้ จึงต้องการประยุกต์ใช้วัสดุประสานจากจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าแกลบที่ได้จากโรงงานโดยตรง โดยไม่ต้องผ่านการบดให้มีค่าใช้จ่ายมากขึ้น ในงานคอนกรีตบล็อกชนิดรับน้ำหนัก โดยมาตรฐานของสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมของกระทรวงอุตสาหกรรม (มาตรฐาน มอก. 57-2533) [9] ได้กำหนดให้คอนกรีตบล็อกชนิดรับน้ำหนักต้องมีกำลังอัดไม่น้อยกว่า 14 เมกะปาสคาล (140 กก./ซม.^{2}) โดยแต่ละก้อนต้องมีกำลังรับแรงอัดไม่ต่ำกว่า 11 เมกะปาสคาล (110 กก./ซม.^{2})

อย่างไรตาม การทำวัสดุจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าแกลบยังจำเป็นต้องหาวัสดุที่มีองค์ประกอบของอะลูมินาจากแหล่งอื่น เนื่องจากเถ้าแกลบมีอะลูมินาต่ำมาก ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้ ได้ใช้เถ้าถ่านหินเป็นแหล่งให้สารประกอบอะลูมินากับวัสดุจีโอพอลิเมอร์ โดยมุ่งประเด็นที่ ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ปริมาณหินฝุ่น และอุณหภูมิบ่มต่อกำลังอัดและการดูดซึมน้ำของคอนกรีตบล็อก

2. วิธีการศึกษา

2.1 วัสดุประสานและมวลรวม

วัสดุประสานที่ในการศึกษาครั้งนี้ประกอบด้วย เถ้าแกลบดำที่ไม่บด (ได้จากโรงงานโดยตรง) มีน้ำหนักค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ในปริมาณร้อยละ 48 ความถ่วงจำเพาะของเถ้าแกลบ เท่ากับ 2.07 สำหรับองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบดำที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ มีปริมาณของ SiO_2 สูงถึงร้อยละ 90 ส่วนเถ้าถ่านหินที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ เป็นเถ้าถ่านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ

2.23 และความละเอียดค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 31.2 โดยน้ำหนัก ซึ่งไม่เกินร้อยละ 34 โดยน้ำหนัก และเป็นไปตามเกณฑ์ของมาตรฐาน ASTM C618 [10] สำหรับองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหิน มีผลรวมของสารประกอบหลัก SiO_2, Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เท่ากับร้อยละ 72.21 ซึ่งจัดเป็นเถ้าถ่านหินชนิด F ตามมาตรฐาน ASTM C 618 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบดำและเถ้าถ่านหินแสดงดังตารางที่ 1

ของเหลวที่ใช้ในการเตรียมวัสดุจีโอพอลิเมอร์ ประกอบด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่มีความเข้มข้น 12, 14, 16, และ 18 โมลาร์

มวลรวมที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ใช้หินฝุ่นที่มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.63 การดูดซึมน้ำของหินฝุ่นที่ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C127 [11] เท่ากับร้อยละ 10.01 และค่าโมดูลัสความละเอียดของหินฝุ่นเท่ากับ 3.07

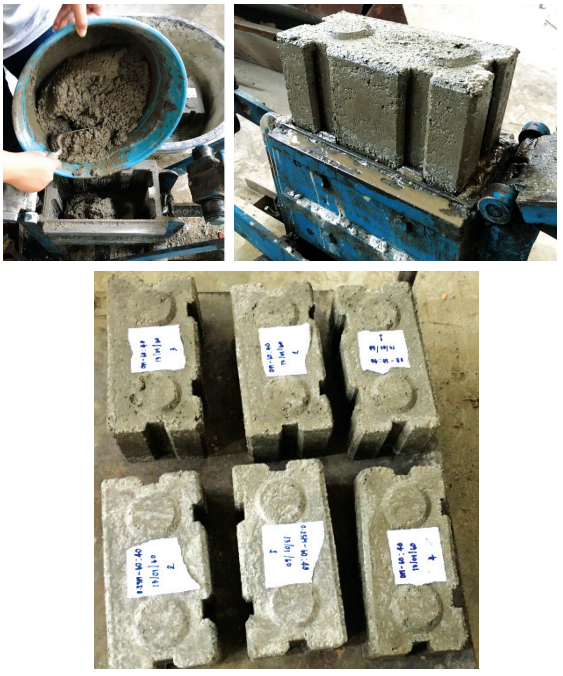
ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน

องค์ประกอบทางเคมี	ร้อยละโดยน้ำหนัก	
	เถ้าแกลบ (RHA)	เถ้าถ่านหิน (FA)
Silicon Dioxide, SiO_2	90.0	35.20
Aluminum Oxide, Al_2O_3	0.51	19.20
Iron Oxide, Fe_2O_3	2.02	17.81
Calcium Oxide, CaO	0.52	16.65
Magnesium Oxide, MgO	0.22	-
Sulfur Trioxide, SO_3	1.50	0.63
Other Oxides	-	2.44
LOI.	4.71	1.5

2.2 การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบ

2.2.1 การเตรียมตัวอย่าง

งานวิจัยนี้ศึกษาการผลิตคอนกรีตบล็อกชนิดรับน้ำหนัก จากจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าแกลบจากโรงงานโดยตรง โดยทำการทดสอบกำลังอัด ความหนาแน่น และการดูดซึมน้ำ โดยเตรียมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกจากจากเถ้าแกลบ



รูปที่ 1 การเตรียมตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อก

ที่ไม่ผ่านการบดและเถ้าถ่านหิน (เถ้าแกลบ : เถ้าถ่านหิน เท่ากับ 50 : 50 โดยน้ำหนัก) สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่มีความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 12, 14, 16 และ 18 โมลาร์ และใช้ปริมาณหินฝุ่นเป็นมวลรวมแทนที่ในอัตราส่วน (เถ้าแกลบผสมเถ้าถ่านหิน) : หินฝุ่น เท่ากับ 1 : 4, 1 : 6 และ 1 : 8 โดยน้ำหนัก ส่วนผสมคอนกรีตบล็อกแสดงดังตารางที่ 2 ในการอัดคอนกรีตบล็อกได้ทำการผสมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์กับเถ้าแกลบและเถ้าถ่านหินทิ้งไว้เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นผสมสารละลายโซเดียมซิลิเกตและหินฝุ่นตามส่วนผสมดังแสดงในตารางที่ 2 คลุกเคล้าส่วนผสมทั้งหมดให้เข้ากัน ก่อนเทลงในแบบหล่อของเครื่องอัดคอนกรีตบล็อกชนิดซินวาแรมในปริมาณที่เท่ากันทุกส่วนผสม ทำการอัดจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกโดยใช้เครื่องอัดชนิดซินวาแรม และบ่มจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกในอากาศที่อุณหภูมิห้อง (25°ซ) และที่อุณหภูมิ 65°ซ เป็นเวลา 24 ชม. จากนั้นบ่มต่อเนื่องในอากาศที่อุณหภูมิห้องจนถึงอายุทดสอบ การเตรียมตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกแสดงดังรูปที่ 1

ตารางที่ 2 ส่วนผสมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อก

ส่วนผสม	ส่วนผสมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อก							ความเข้มข้นของ NaOH (โมลาร์)
	วัสดุประสาน (กรัม)		หินฝุ่น (กรัม)			NaOH (กรัม)	$Na_2O : SiO_3$ (กรัม)	
	เถ้าแกลบ	เถ้าถ่านหิน	วัสดุประสาน : หินฝุ่น					
			1 : 4	1 : 6	1 : 8			
1 : 4 (12M)	772	772	6176	0	0	436	868	12
1 : 6 (12M)	772	772	0	9264	0	436	868	12
1 : 8 (12M)	772	772	0	0	12352	436	868	12
1 : 4 (14M)	772	772	6176	0	0	436	868	14
1 : 6 (14M)	772	772	0	9264	0	436	868	14
1 : 8 (14M)	772	772	0	0	12352	436	868	14
1 : 4 (16M)	772	772	6176	0	0	436	868	16
1 : 6 (16M)	772	772	0	9264	0	436	868	16
1 : 8 (16M)	772	772	0	0	12352	436	868	16
1 : 4 (18M)	772	772	6176	0	0	436	868	18
1 : 6 (18M)	772	772	0	9264	0	436	868	18
1 : 8 (18M)	772	772	0	0	12352	436	868	18

2.2.2 การทดสอบ

ก) ทดสอบกำลังอัด

เมื่อครบกำหนดทดสอบทำการตัดตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกเป็นทรงลูกบาศก์ขนาด 50×50×50 มม.^{3} ดังรูปที่ 2 เพื่อใช้ทดสอบกำลังอัด (เฉลี่ยจาก 3 ก้อน) ที่อายุ 7, 14 และ 28 วัน ซึ่งเป็นวิธีเตรียมตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัยที่ผ่านมา [12]

ข) ทดสอบการดูดซึมน้ำ

ได้ทดสอบการดูดซึมน้ำ ตามมาตรฐาน ASTM C642-97 [13] โดยตัดตัวอย่างคอนกรีตบล็อกให้มีขนาด 50×50×50 มม.^{3} นำตัวอย่างคอนกรีตบล็อกเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 100–110°ซ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนักตัวอย่างและแช่ตัวอย่างคอนกรีตบล็อกให้จมอยู่ในน้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วใช้ผ้าเช็ดให้แห้งโดยรอบอย่างเร็ว และชั่งน้ำหนัก ภายใน 5 นาที คำนวณหาร้อยละการดูดซึมน้ำของคอนกรีตบล็อก จากน้ำหนักตัวอย่างคอนกรีตบล็อกหลังจากแช่น้ำ 24 ชั่วโมง ลบด้วยน้ำหนักคอนกรีตบล็อกที่อบแห้งหารด้วยน้ำหนักคอนกรีตบล็อกที่อบแห้งทั้งหมดคูณด้วย 100 โดยทดสอบหาร้อยละการดูดซึมน้ำที่อายุ 28 วัน

รูปที่ 2 การตัดตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกสำหรับทดสอบกำลังอัด

3. วิเคราะห์ผลการศึกษา

3.1 การพัฒนากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อก

กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกจากเถ้าแกลบผสมเถ้าถ่านหิน ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

ตารางที่ 3 กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกจากเถ้าแกลบผสมเถ้าถ่านหินที่บ่มที่อุณหภูมิห้องและบ่มที่อุณหภูมิ 65°ซ

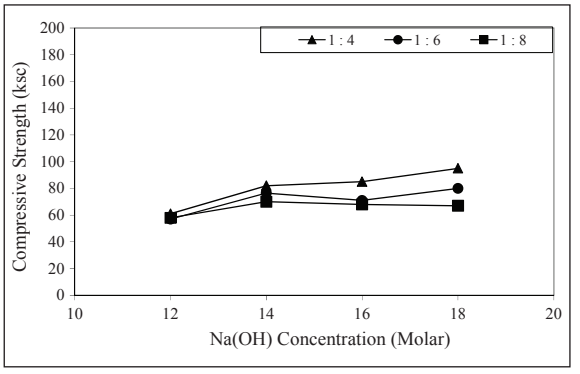
ส่วนผสม	บ่มที่อุณหภูมิห้อง (25°ซ)				บ่มที่อุณหภูมิ 65°ซ			
	กำลังอัด (กก./ซม.^{2})			กำลังอัด 28 วัน เทียบ 7 วัน (ร้อยละ)	กำลังอัด (กก./ซม.^{2})			กำลังอัด 28 วัน เทียบ 7 วัน (ร้อยละ)
	7 วัน	14 วัน	28 วัน		7 วัน	14 วัน	28 วัน	
1 : 4 (12M)	61	125	134	220	119	165	216	182
1 : 6 (12M)	57	90	120	211	112	129	163	182
1 : 8 (12M)	58	77	116	200	109	121	150	138
1 : 4 (14M)	82	109	159	194	132	175	215	163
1 : 6 (14M)	77	84	149	195	120	176	190	159
1 : 8 (14M)	70	95	126	179	110	132	156	142
1 : 4 (16M)	85	100	167	196	134	165	220	164
1 : 6 (16M)	71	83	155	217	117	129	189	161
1 : 8 (16M)	68	85	151	221	96	115	168	176
1 : 4 (18M)	95	121	184	193	135	155	207	153
1 : 6 (18M)	80	104	139	174	100	145	152	152
1 : 8 (18M)	67	107	124	185	98	112	137	139

เท่ากับ 12, 14, 16 และ 18 โมลาร์ ที่บ่มในอุณหภูมิห้องและบ่มในอุณหภูมิ 65°ซ ดังตารางที่ 3 พบว่า จีโอพอลิเมอร์ของคอนกรีตบล็อกที่ใช้ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ในช่วง 14–18 โมลาร์ และอัตราส่วนระหว่าง (เถ้าแกลบผสมเถ้าถ่านหิน) ต่อ หินฝุ่น ไม่เกิน 1 : 6 โดยน้ำหนัก ให้กำลังอัดมากกว่า 140 กก./ซม.^{2} ซึ่งสามารถใช้เป็นคอนกรีตบล็อกชนิดรับน้ำหนักตามมาตรฐานของสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมของกระทรวงอุตสาหกรรม (มอก. 57-2533) [9] ได้ โดยทุกส่วนผสมมีกำลังอัดเพิ่มขึ้นตามอายุบ่ม โดยการพัฒนากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกที่พิจารณาในรูปของร้อยละของกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เทียบกับ 7 วัน ของกลุ่มที่บ่มในอุณหภูมิห้องอยู่ในช่วงร้อยละ 193 ถึง 229 และไม่มีแนวโน้มที่ชัดเจนตามความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ส่วนกลุ่มที่บ่มที่อุณหภูมิ 65°ซ มีร้อยละกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เทียบกับอายุ 7 วัน มีแนวโน้มลดลงตามความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่เพิ่มขึ้น เช่น จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกที่ใช้ปริมาณมวลรวมน้อย (1 : 4) และใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 12, 14, 16 และ 18 โมลาร์ ที่บ่มในอุณหภูมิ 65°ซ มีร้อยละของกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เทียบกับ 7 วัน เท่ากับ 182, 163, 164 และ 153 ตามลำดับ ซึ่งผลดังกล่าวอาจเกิดจากจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตกลุ่มนี้มีกำลังอัดที่สูงในช่วงต้น โดยกำลังอัดที่อายุ 7 วัน ของจีโอพอลิเมอร์กลุ่มนี้ เพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ซึ่งเท่ากับ 119, 132, 134 และ 135 กก./ซม.^{2} ตามลำดับ แต่ที่อายุ 28 วัน กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกกลุ่มนี้ กลับมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยตามความเข้มข้นของสารละลาย NaOH โดยมีกำลังอัดเท่ากับ 216, 215, 220 และ 207 กก./ซม.^{2} ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การบ่มร้อนให้จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกในช่วงอายุต้นๆ ส่งผลให้ปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันในช่วงต้นเกิดเร็วขึ้น ซึ่งซิลิกาและอะลูมินาที่ถูกชะออกมาโดยสารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นสูงขึ้น ได้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันได้ดี [14], [15] และมีกำลังอัดที่อายุ 7 วัน สูงขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลาย NaOH นอกจากนั้น การบ่มจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกในอุณหภูมิห้อง มีการพัฒนากำลังอัดในรูปของร้อยละของกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เทียบกับ 7 วัน

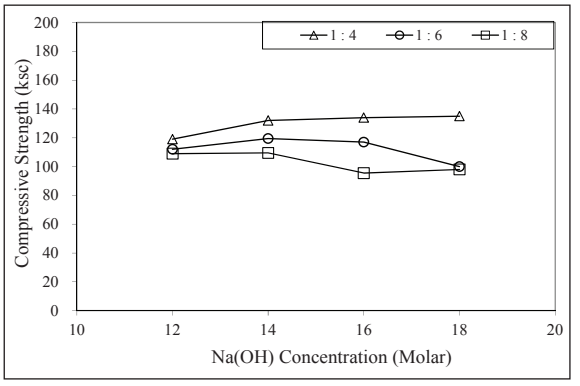
สูงกว่ากลุ่มที่บ่มในอุณหภูมิ 65°ซ และเป็นแนวโน้มเดียวกันทุกส่วนผสม ทั้งนี้เป็นผลจากกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกกลุ่มที่บ่มในอุณหภูมิ 65°ซ มีค่าสูงที่อายุต้นอยู่แล้ว จึงทำให้ร้อยละของกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เทียบกับ 7 วัน มีค่าต่ำกว่ากลุ่มที่บ่มในอุณหภูมิห้อง

3.2 ผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อก

เมื่อพิจารณาผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกที่อายุ 7 วัน ที่บ่มในอุณหภูมิห้อง (25°ซ) และบ่มในอุณหภูมิ 65°ซ ดังแสดงในรูปที่ 3 (ก) และ (ข) ตามลำดับ พบว่า ที่อายุช่วงต้นกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกมีแนวโน้มสูงขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่มากขึ้น โดยเห็นผลชัดเจนในกลุ่มที่บ่มในอุณหภูมิห้องมากกว่ากลุ่มที่บ่ม ในอุณหภูมิ 65°ซ เช่น จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกที่ใช้มวลรวมปริมาณน้อย (1 : 4) และใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 12, 14, 16 และ 18 โมลาร์ ที่บ่มในอุณหภูมิห้อง และบ่มที่อุณหภูมิ 65°ซ มีกำลังอัดที่อายุ 7 วัน เท่ากับ 61, 82, 85, 95 และ 119, 132, 134, 135 กก./ซม.^{2} ตามลำดับ ส่วนกลุ่มที่ใช้มวลรวมปริมาณมาก (1 : 8) กลับพบว่า กำลังอัดมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยที่ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH สูงขึ้นมากกว่า 16 โมลาร์ โดยเห็นผลชัดเจนเมื่อให้ความร้อนกับจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อก โดยผลดังกล่าวอาจเกิดจากการใช้มวลรวมปริมาณมาก ปริมาณเพสต์ลดลง ผลของเพสต์ที่มีผลต่อกำลังอัดของคอนกรีตบล็อกจะลดลงด้วย โดยเฉพาะคอนกรีตบล็อกที่มีการอัดด้วยแรงให้แน่น ส่วนในคอนกรีตบล็อกที่ใช้เพสต์ปริมาณมาก [มวลรวมปริมาณน้อย (1:4)] กำลังอัดของคอนกรีตบล็อกจะขึ้นกับสมบัติของเพสต์มากขึ้น ซึ่งการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกที่ใช้ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่มากขึ้น เป็นผลจากสารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นสูงขึ้น สามารถชะเอาซิลิกาและอะลูมินาจากเถ้าถ่านหินได้มากขึ้น ซึ่งทำให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันได้สมบูรณ์ และส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีกำลังอัดสูงขึ้นได้ [16], [17]



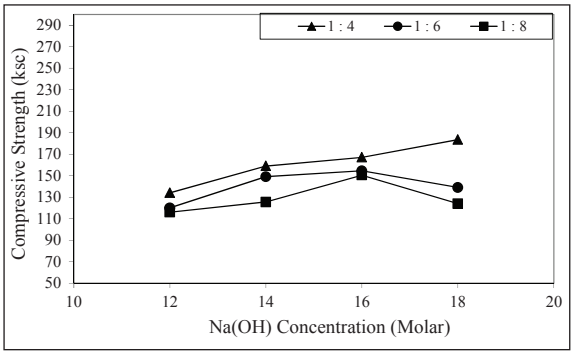
(ก) บ่มที่อุณหภูมิห้อง



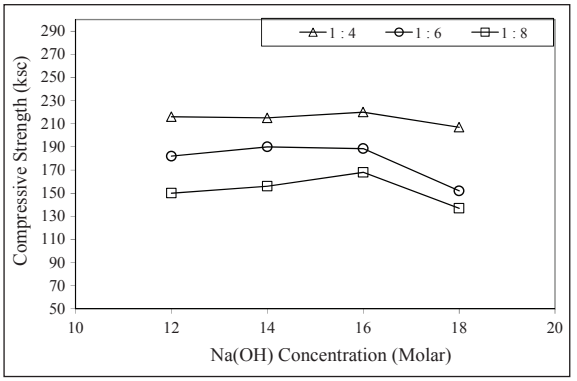
(ข) บ่มที่อุณหภูมิ 65°ซ

รูปที่ 3 ผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกที่อายุบ่ม 7 วัน

เมื่อพิจารณาที่อายุบ่มจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมากขึ้นเป็น 28 วัน ดังรูปที่ 4 พบว่า แนวโน้มส่วนใหญ่ให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกสูงขึ้น เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH สูงไม่เกิน 16 โมลาร์ โดยเห็นผลชัดเจนในคอนกรีตบล็อกที่ใช้มวลรวมปริมาณปานกลาง (1 : 6) และปริมาณมาก (1 : 8) ซึ่งเป็นแนวโน้มเดียวกันทั้งกลุ่มที่บ่มในอุณหภูมิห้อง [รูปที่ 4 (ก)] และที่บ่มในอุณหภูมิ 65°ซ [รูปที่ 4 (ข)] โดยผลดังกล่าวอาจเกิดจากความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่สูงเกินไป มีผลให้ NaOH ส่วนที่เหลือสัมผัสกับความชื้นซึ่งทำให้ลื่น ส่งผลให้การยึดประสานลดลง และทำให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกลดลงได้ [18] โดยการศึกษาที่ผ่านมา [19] พบว่า การชะเอาซิลิกา



(ก) บ่มที่อุณหภูมิห้อง



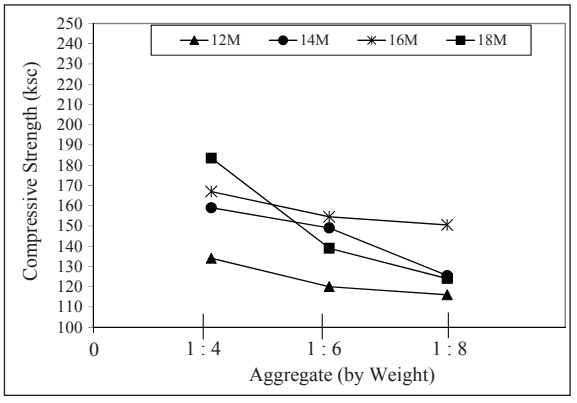
(ข) บ่มที่อุณหภูมิ 65°ซ.

รูปที่ 4 ผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกที่อายุบ่ม 28 วัน

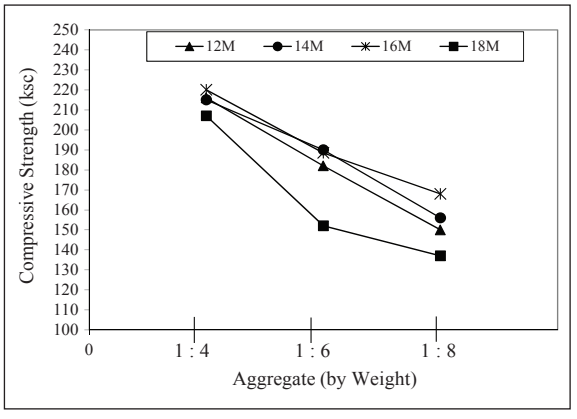
และอะลูมินาจากเถ้าถ่านหินมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สูงมากกว่า 15 โมลาร์ ส่วนในมวลรวมที่มีปริมาณน้อยพบว่า กำลังอัดมีแนวโน้มสูงขึ้นเล็กน้อยเมื่อใช้สารละลาย NaOH เข้มข้นสูงถึง 18 โมลาร์ อาจเกิดจากการอัดแน่นของจีโอพอลิเมอร์เพสต์ที่มีปริมาณสูง (ปริมาณมวลรวมต่ำ) ในเครื่องอัดคอนกรีตบล็อก ที่ทำให้คอนกรีตบล็อกมีกำลังอัดสูงขึ้นได้

3.3 ผลของปริมาณมวลรวมต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกจากเถ้าแกลบและเถ้าถ่านหิน

เมื่อพิจารณาผลของปริมาณมวลรวมต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกจากเถ้าแกลบและเถ้าถ่านหิน ที่บ่มในอุณหภูมิห้องและบ่มในอุณหภูมิ 65°ซ ที่ อายุ 28 วัน ดังแสดงในรูปที่ 5 (ก) และ (ข) ตามลำดับ พบว่า จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกทุกส่วนผสมมีกำลังอัดลดลงตามปริมาณของมวลรวมที่มากขึ้น เช่น จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกที่ใช้ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH เท่ากับ 12 โมลาร์ และใช้ปริมาณมวลรวมปริมาณน้อย (1 : 4) ปานกลาง (1 : 6) และมาก (1 : 8) ให้กำลังอัดในกลุ่มที่บ่มในอุณหภูมิห้องและบ่มในอุณหภูมิ 65°ซ ที่ อายุ 28 วัน เท่ากับ 134, 120, 116 และ 216, 163, 150 กก./ซม.^{2} ตามลำดับ และเป็นในทิศทางเดียวกันในทุกความเข้มข้นของสารละลาย NaOH กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกจากเถ้าแกลบและเถ้าถ่านหินที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้ เป็นผลจากสมบัติของจีโอพอลิเมอร์เพสต์ที่ยึดเกาะระหว่างมวลรวม ส่งผลให้มีกำลังอัดที่สูงขึ้น และอีกส่วนเป็นผลจากการอัดแน่นเชิงกลที่เกิดจากการอัดจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกเพื่อขึ้นรูปเป็นก้อน ทำให้จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกสามารถรับแรงได้สูงขึ้น [12] ซึ่งการศึกษาครั้งนี้พบว่า เมื่อใช้จีโอพอลิเมอร์เพสต์ปริมาณต่ำลง (มวลรวมมากขึ้น) ส่งผลให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกต่ำลงอย่างชัดเจน ซึ่งแสดงให้เห็นว่า จีโอพอลิเมอร์เพสต์มีผลชัดเจนต่อการยึดประสานมวลรวมเข้าด้วยกัน และทำให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกสูงขึ้นตามปริมาณเพสต์ ซึ่งผลดังกล่าวนี้สอดคล้องกับกำลังอัดของคอนกรีตทั่วไปที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุประสาน ที่พบว่า กำลังอัดของคอนกรีตสูงขึ้นตามปริมาณของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มากขึ้น นอกจากนั้นพบว่า การลดลงของกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อก เมื่อเพิ่มปริมาณมวลรวมจากปริมาณน้อย (1 : 4) ไปมาก (1 : 8) มีผลชัดเจนกับกลุ่มที่ใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นสูงมากกว่าความเข้มข้นต่ำ (สังเกตจากความชันของกราฟรูปที่ 5) ซึ่งผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่ากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกขึ้นกับความแข็งแรงของเพสต์อย่างชัดเจน โดยการลดปริมาณของเพสต์ที่มีความแข็งแรงสูง (ความเข้มข้นของ NaOH สูง) จึงมีผลทำให้กำลังอัดลดลงชัดเจนมากกว่ากลุ่มที่ใช้จีโอพอลิเมอร์เพสต์ที่มีความแข็งแรงต่ำ (ความเข้มข้นของ NaOH ต่ำ) โดยเห็นผลชัดเจนในกลุ่มที่บ่มในอุณหภูมิห้อง



(ก) บ่มที่อุณหภูมิห้อง



(ข) บ่มที่อุณหภูมิ 65°ซ

รูปที่ 5 ผลของปริมาณมวลรวมต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อก ที่อายุบ่ม 28 วัน

3.4 ผลของอุณหภูมิต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกจากเถ้าแกลบและเถ้าถ่านหิน

เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกจากเถ้าแกลบและเถ้าถ่านหิน ดังตารางที่ 3 พบว่า การบ่มจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกที่อุณหภูมิ 65°ซ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนบ่มต่อเนื่องในอากาศจนถึงอายุทดสอบ ส่งผลให้กำลังอัดที่ทุกอายุการบ่มสูงขึ้นอย่างชัดเจน โดยมีแนวโน้มเหมือนกันในทุกความเข้มข้นของสารละลาย NaOH และทุกกลุ่มของปริมาณมวลรวมหยาบที่ต่างกัน เช่น จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกที่ใช้มวลรวมปริมาณน้อย (1 : 4) และใช้สารละลาย NaOH เข้มข้น 12, 14, 16 และ 18 โมลาร์ ของกลุ่มที่บ่มในอุณหภูมิห้อง ให้กำลังอัดที่อายุบ่มที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 134, 159, 167 และ 184 กก./ซม.^{2} ตามลำดับ และเมื่อบ่มที่อุณหภูมิ 65°ซ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ส่งผลให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกกลุ่มดังกล่าวเพิ่มขึ้นเป็น 216, 215, 220 และ 207 กก./ซม.^{2} ตามลำดับ โดยผลดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [12] ที่พบว่าการบ่มจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกจากเถ้าถ่านหิน ที่ได้จากโรงงานโดยตรงในอุณหภูมิที่สูงขึ้น ส่งผลให้กำลังอัดสูงกว่ากลุ่มที่บ่มในอุณหภูมิห้องอย่างชัดเจน ซึ่งเป็นผลจากจากการเพิ่มอุณหภูมิในการบ่มเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอไรเซชัน ให้เกิดปฏิกิริยาได้เร็วและสมบูรณ์มากขึ้น [14], [15] เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพของอุณหภูมิบ่ม (Effective Curing Temperature) ต่อกำลังอัดจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกจากเถ้าแกลบผสมเถ้าถ่านหินตามสมการที่ (1) [14]

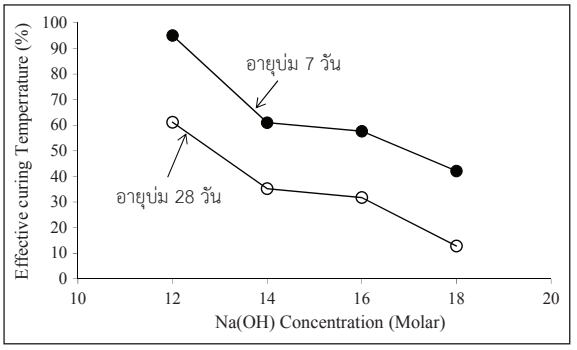
$$E_T = \frac{[(C_{65} - C_R) \times 100]}{C_R} \quad (1)$$

เมื่อ E_T = ประสิทธิภาพของอุณหภูมิบ่ม (ร้อยละ)

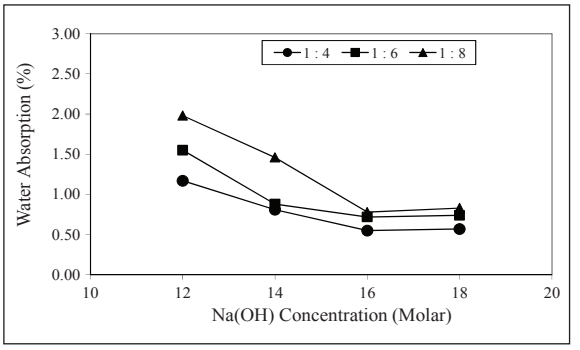
C_{65} = กำลังอัดจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกจากเถ้าแกลบผสมเถ้าถ่านหินที่บ่มในอุณหภูมิ 65°ซ (กก./ซม.^{2})

C_R = กำลังอัดจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกจากเถ้าแกลบผสมเถ้าถ่านหินที่บ่มในอุณหภูมิห้อง (กก./ซม.^{2})

พิจารณาผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่อประสิทธิภาพของอุณหภูมิบ่มในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกจากเถ้าแกลบผสมเถ้าถ่านหิน ที่ใช้มวลรวมปริมาณน้อย (1 : 4) ที่อายุบ่ม 7 และ 28 วัน ที่ได้จากการคำนวณตามสมการที่ (1) ดังรูปที่ 6 พบว่า การใช้ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH สูงขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพของอุณหภูมิที่ใช้บ่มจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกลดลงอย่างชัดเจน โดยมีแนวโน้มเหมือนกันทั้งที่อายุ 7 และ 28 วัน โดยผลดังกล่าวสอดคล้องกับผลการศึกษาที่ผ่านมา [12] ที่ทำการทดสอบในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกจากเถ้าถ่านหินเพียงอย่างเดียว อาจเป็นผลจากสารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นสูง สามารถชะเอาซิลิกาและอะลูมินาจากเถ้าแกลบและถ่านหินได้มาก การเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันที่ส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อก



รูปที่ 6 ผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่อประสิทธิภาพของอุณหภูมิบ่มในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อก ที่ใช้มวลรวมปริมาณน้อย (1 : 4) ที่อายุบ่ม 7 และ 28 วัน



รูปที่ 7 ผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่อการดูดซึมน้ำของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกจากเถ้าแกลบผสมเถ้าถ่านหิน

มีกำลังอัดสูงได้โดยไม่ต้องใช้ความร้อนกระตุ้นมาก [16], [17] นอกจากนั้นพบว่า การบ่มจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกที่อุณหภูมิสูงขึ้น มีผลต่อการเพิ่มกำลังอัดในช่วงอายุต้น (7 วัน) มากกว่าอายุ 28 วัน ซึ่งเป็นผลจากการให้ความร้อนเพื่อเร่งปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันในช่วงอายุต้นก่อนที่จะบ่มต่อเนื่องในอากาศ

3.5 การดูดซึมน้ำของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อก

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซึมน้ำกับความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกจากเถ้าแกลบผสมเถ้าถ่านหิน ที่ใช้มวลรวมปริมาณต่างๆ กัน ดังรูปที่ 7 พบว่า ร้อยละการดูดซึมน้ำในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกมีค่าต่ำลง เมื่อใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นสูงขึ้น และใช้มวลรวมในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกในปริมาณที่ลดลง โดยผลดังกล่าวสอดคล้องกับกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกที่สูงขึ้นด้วย ซึ่งแสดงให้เห็นว่า จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกจากเถ้าแกลบผสมเถ้าถ่านหินที่มีกำลังอัดสูงขึ้น จีโอพอลิเมอร์เพสต์มีความแข็งแรงและยึดประสานระหว่างมวลรวมได้ดีขึ้น ส่งผลให้เนื้อจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกมีความทึบน้ำและลดการดูดซึมน้ำเข้าไปในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกลงได้อย่างชัดเจน โดยผลดังกล่าวมีแนวโน้มเหมือนกับคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทั่วไป ที่ความทึบน้ำในคอนกรีตขึ้นกับกำลังรับแรงอัดเป็นหลัก [20] อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกันคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินในงานวิจัยที่ผ่านมา [21] พบว่าความทึบน้ำในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินคุณภาพดีไม่ได้ขึ้นกับกำลังอัดของคอนกรีตเป็นหลัก แต่ขึ้นกับลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของเถ้าถ่านหินด้วย เช่น คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินในปริมาณสูงขึ้น ส่งผลให้กำลังอัดมีแนวโน้มลดลง แต่กลับพบว่าคอนกรีตมีความทึบน้ำมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากลักษณะทางกายภาพของเถ้าถ่านหินที่มีลักษณะกลมตัน สามารถแทรกตัวและลดความพรุนในเนื้อคอนกรีตได้ ส่วนคอนกรีตหรือคอนกรีตบล็อกที่ใช้จีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุประสาน ความทึบน้ำจะขึ้นกับสมบัติของจีโอพอลิเมอร์เพสต์ที่เป็นผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันมากกว่าลักษณะทางกายภาพของวัสดุตั้งต้น

4. สรุป

จากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

4.1 การใช้ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่สูงขึ้นส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกจากเถ้าแกลบผสมเถ้าถ่านหินมีกำลังอัดสูงขึ้น และการดูดซึมน้ำมีค่าลดลง โดยเห็นผลชัดเจนในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกที่ใช้มวลรวมปริมาณต่ำสุดคือ (เถ้าแกลบ+ถ่านหิน) : หินฝุ่น เท่ากับ 1 : 4 โดยน้ำหนัก

4.2 การใช้มวลรวมผสมในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกในปริมาณที่มากขึ้นส่งผลให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกลดลงโดยเห็นผลชัดเจนในกลุ่มที่ใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นสูงมากกว่าความเข้มข้นต่ำ

4.3 การใช้อุณหภูมิในการบ่ม 65°ซ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ส่งผลให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกสูงกว่ากลุ่มที่บ่มในอุณหภูมิห้องอย่างชัดเจน โดยอุณหภูมิบ่มที่สูงขึ้นมีประสิทธิภาพต่อการเพิ่มกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกจากเถ้าแกลบผสมเถ้าถ่านหิน ในกลุ่มที่ใช้ความเข้มข้นของ สารละลาย NaOH ต่ำ มากกว่าความเข้มข้นของสารละลาย NaOH สูง

4.4 การศึกษาครั้งนี้ พบว่าจีโอพอลิเมอร์ของคอนกรีตบล็อกที่ใช้ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ในช่วง 14–18 โมลาร์ และอัตราส่วนระหว่าง (เถ้าแกลบ+เถ้าถ่านหิน) ต่อหินฝุ่น ไม่เกิน 1 : 6 โดยน้ำหนัก ให้กำลังอัดสูงกว่ากำลังอัดของคอนกรีตบล็อกชนิดรับน้ำหนัก ตามมาตรฐาน มอก. 57-2533 ที่กำหนดให้คอนกรีตบล็อกชนิดรับน้ำหนักต้องมีกำลังอัดไม่น้อยกว่า 14 เมกะปาสคาล (140 กก./ซม.^{2}) โดยแต่ละก้อนต้องมีกำลังรับแรงอัดไม่ต่ำกว่า 11 เมกะปาสคาล (110 กก./ซม.^{2})

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ ทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนจากรัฐบาล (งบประมาณเงินแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2560 มหาวิทยาลัยบูรพา ผ่านสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ เลขที่สัญญา 104/2560

เอกสารอ้างอิง

[1] W. Tangchirapat, R. Buranasing, C. Jaturapitakkul, and P. Chindaprasirt, “Influence of rice husk-bark ash on mechanical properties of concrete containing high amount of recycled aggregates,” *Construction and Building Materials*, vol. 22, no. 8, pp. 1812–1819, 2008.

[2] U. Rattanasak and P. Chindaprasirt, *Rice Husk Ash in Concrete*, 1th ed. Bangkok: Thailand Concrete Association, 2010 (in Thai).

[3] U. Chatveera and P. Srinourn, “A study of properties of mortar portland cement type V mixed with ground rice husk ash and limestone powder,” *KMUTT Research and Development Journal*, vol. 35, no. 2, pp. 201–218, 2012 (in Thai).

[4] R. Soeurt and W. Chalee, “Compressive strength improvement of concrete containing rice husk ash using an alkaline activator,” *Journal of King Mongkut’s University of Technology North Bangkok*, vol. 26, no. 3, pp. 347–357, 2016 (in Thai).

[5] Q. Feng, H. Yamamichi, M. Shoya, and S. Sugita, “Study on the pozzolanic properties of rice husk ash by hydrochloric acid pretreatment,” *Cement and Concrete Research*, vol. 34, no. 3, 2004, pp. 521–526, 2004.

[6] K. Kuennokkhum, W. Koraviyothin, and W. Chalee, “Effect of Na(OH) concentration on water flow rate and compressive strengths of fly ash-based geopolymer porous concrete,” *Journal of King Mongkut’s University of Technology North Bangkok*, vol. 24, no. 1, pp. 56–65, 2014 (in Thai).

[7] P. Chindaprasirt, C. Jaturapitakkul, W. Chalee, and U. Rattanasak, “Comparative study on the characteristics of fly ash and bottom ash geopolymers,” *Waste Manage*, vol. 29, no. 2, pp. 539–543, 2009.

[8] U. Rattanasak and P. Chindaprasirt, “Influence of Na(OH) solution on the synthesis of fly ash geopolymer,” *Minerals Engineering*, vol. 22, no. 12, pp. 1073–1078, 2009.

[9] *Hollow load-bearing masonry units*, Thai Industrial Standard TIS 57-2533, 1990 (in Thai).

[10] *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*, Annual Book of ASTM Standards 04. 02, C618, 2003.

[11] *Standard Test Method for Specific Gravity and Absorption of Coarse Aggregate*, Annual Book of ASTM Standards 04. 02, C127, 2001.

[12] P. Huy, S. Mov, and W. Chalee, "Production of hollow load-bearing concrete masonry blocks from fly ash-based geopolymer," *Burapha Science Journal*, vol. 12, no. 2, pp. 31–46, 2016 (in Thai).

[13] *Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete*, Annual Book of ASTM Standards 04. 01, C642-97, 2001.

[14] N. Phatitriwatt and W. Chalee, "Effect of temperature curing on compressive strength of fly ash-based geopolymer mortar," *KMUTT Research and Development Journal*, vol. 40, no. 3, pp. 355–364, 2017 (in Thai).

[15] P. Chindaprasirt, U. Rattanasak, and S. Taebuanhuad, "Resistance to acid and sulfate solutions of microwave-assisted high calcium fly ash geopolymer," *Materials and Structures*, vol. 46, no. 3, pp. 375–381, 2013.

[16] P. Chindaprasirt and W. Chalee, "Effect of sodium hydroxide concentration on chloride penetration and steel corrosion of fly ash-based geopolymer concrete under marine site," *Construction and Building Materials*, vol. 63, pp. 303–310, 2014.

[17] 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*, vol. 45, pp. 9–14, 2014.

[18] C. Sanawong, S. Somna, and W. Chalee, "Compressive and bond strengths of fly ash-based geopolymer concrete," *Burapha Science Journal*, vol. 15, no. 1, pp. 13–22, 2010 (in Thai).

[19] U. Rattanasak and W. Chalee, "Study of leaching of lignite fly ash and strength of fly ash based-geopolymer," *KMUTT Research and Development Journal*, vol. 29, no. 4, pp. 437–446, 2006 (in Thai).

[20] W. Chalee, P. Ausapanit, and C. Jaturapitakkul, "Utilization of fly ash concrete in marine environment for long term design life analysis," *Materials and Design*, vol. 31, no. 3, pp. 1242–1249, 2010.

[21] K. Charoenprom and W. Chalee, "Relation between water permeability and chloride diffusion coefficient of concrete under 10-year exposure in marine environment," *Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok*, vol. 23, no. 1, pp. 29–41, 2013 (in Thai).