วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีที่ 26 ฉบับที่ 3 ก.ย.–ธ.ค. 2559
The Journal of KMUTNB., Vol. 26, No. 3, Sep.–Dec. 2016

บทความวิจัย

การปรับปรุงกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบโดยใช้ด่างเร่งปฏิกิริยา

Reaksmey Soeurt
นักศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
วิเชียร ชาลี*
รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 08-9791-5171 อีเมล: wichian@buu.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2015.12.006
รับเมื่อ 16 ตุลาคม 2558 ตอบรับเมื่อ 23 ธันวาคม 2558 เผยแพร่ออนไลน์ 13 กันยายน 2559
© 2016 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการปรับปรุงกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ (RHA) ในปริมาณสูง โดยใช้ด่างในการเร่งปฏิกิริยา นำเถ้าแกลบที่ได้จากโรงงานโดยตรงมาบดให้ค้างตะแกรงขนาด 45 ไมโครเมตร (ตะแกรงเบอร์ 325) น้อยกว่าร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก และใช้เถ้าแกลบเป็นวัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 40, 50 และ 60 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ผสมคอนกรีตจากเถ้าแกลบโดยใช้ด่างเร่งปฏิกิริยา ที่เป็นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0, 0.5, 1.0 และ 1.5 โมลาร์ หล่อตัวอย่างคอนกรีตขนาด 100 × 100 × 100 มม.^{3} เพื่อใช้ในการทดสอบกำลังอัด ที่อายุ 7, 14, 28 และ 60 วัน ผลการศึกษาพบว่า กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบมีแนวโน้มสูงขึ้น เมื่อใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 0.5 โมลาร์โดยเฉพาะในกลุ่มที่ใช้เถ้าแกลบในปริมาณสูง (ร้อยละ 60 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน) อย่างไรก็ตาม กำลังอัดของคอนกรีตมีแนวโน้มลดลงเมื่อใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นสูงขึ้นเป็น 1.5 โมลาร์

คำสำคัญ: เถ้าแกลบ ด่างเร่งปฏิกิริยา กำลังอัด ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

การอ้างอิงบทความ: Reaksmey Soeurt และ วิเชียร ชาลี, "การปรับปรุงกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบโดยใช้ด่างเร่งปฏิกิริยา," *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, ปีที่ 26, ฉบับที่ 3, หน้า 347–357, ก.ย.–ธ.ค. 2559

วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีที่ 26 ฉบับที่ 3 ก.ย.–ธ.ค. 2559
The Journal of KMUTNB., Vol. 26, No. 3, Sep.–Dec. 2016

Research Article

Compressive Strength Improvement of Concrete Containing Rice Husk Ash Using an Alkaline Activator

Reaksmey Soeurt
Student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Burapha University, Chon Buri, Thailand

Wichian Chalee*
Associate Professor, Department of Civil Engineering, 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.2015.12.006
Received 16 October 2015; Accepted 23 December 2015; Published online: 13 September 2016
© 2016 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

This research aimed to improve the compressive strength of high volume rice husk ash (RHA) concrete using alkaline activator. The original RHA was ground until the particles retained on a 45-μm sieve (sieve No. 325) were less than 30%. Original RHA was used as a pozzolanic material to replace Portland cement type I at 40, 50 and 60% by weight of the binder. NaOH concentrations of 0, 0.5, 1.0 and 1.5 molar were used as an alkaline activator in RHA concrete. Concrete cube specimens of 100 × 100 × 100 mm^3 were casted for compressive strength test at the ages of 7, 14, 28 and 60 days. The results revealed that the compressive strength of RHA concrete tends to increase with the NaOH concentration of 0.5 molar, especially in concrete with high volume rice husk ash (60% by weight of binder). However, the compressive strength of concrete decreases when NaOH concentration up to 1.5 molar is used in the mixture.

Keywords: Rice Husk Ash, Alkaline Activator, Compressive Strength, Sodium Hydroxide Concentration

Please cite this article in press as: R. Soeurt and W. Chalee, "Compressive strength improvement of concrete containing rice husk ash using an alkaline activator," *The Journal of KMUTNB.*, vol. 26, no. 3, pp. 347–357, Sep.–Dec. 2016 (in Thai).

1. บทนำ

วัสดุปอซโซลานคือ วัสดุที่ประกอบด้วยออกไซด์ของซิลิกา หรือซิลิกาและอลูมินาเป็นองค์ประกอบหลัก [1] โดยทั่วไปวัสดุปอซโซลานมีสมบัติของวัสดุประสานน้อยมากหรือไม่มีเลย แต่เมื่อมีความละเอียดที่เหมาะสมและมีความชื้นที่เพียงพอ จะสามารถทำปฏิกิริยากับด่างหรือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทำให้ได้สารประกอบที่มีสมบัติในการยึดประสานได้ดี [2] ปัจจุบันวัสดุปอซโซลานนิยมนำมาใช้ในงานคอนกรีต เพื่อช่วยปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตให้ดีขึ้น ทั้งในด้านการรับแรงเชิงกล ความคงทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมี และสามารถลดต้นทุนในการผลิตคอนกรีตลงได้ วัสดุปอซโซลานแต่ละชนิดมีผลดีกับคอนกรีตแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมี และลักษณะทางกายภาพ [3]–[5] ซึ่งความละเอียดเป็นปัจจัยหลักทางกายภาพที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดี ปัจจุบันวัสดุปอซโซลานที่มีการนำมาใช้ในเชิงพาณิชย์อย่างแพร่หลาย ได้แก่ เถ้าถ่านหิน และซิลิกาฟูม เนื่องจากมีอนุภาคที่ละเอียดที่สามารถนำมาใช้แทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ โดยไม่ต้องผ่านกระบวนการบดให้ละเอียด อย่างไรก็ตามยังมีวัสดุปอซโซลานในประเทศอีกจำนวนมาก ที่มีสมบัติทางเคมีที่ดีตลอดจนให้ผลการศึกษาเบื้องต้นไปในทิศทางที่ดี แต่ไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ในเชิงพาณิชย์ได้ เช่น เถ้าแกลบ เถ้าปาล์มน้ำมัน เถ้าชานอ้อย เถ้าแกลบเปลือกไม้ เป็นต้น เนื่องจากมีอนุภาคที่หยาบ ดูดน้ำมาก มีความพรุนสูง ทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้ไม่สมบูรณ์ [2] และการนำวัสดุปอซโซลานดังกล่าวมาผสมคอนกรีต จำเป็นต้องบดให้ละเอียดจึงจะสามารถใช้งานได้ ซึ่งส่งผลต่อต้นทุนการผลิตที่สูงขึ้น

แกลบเป็นวัสดุเหลือทิ้งที่นำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในโรงงานอุตสาหกรรม การนำแกลบไปเผาจะได้เถ้าแกลบสีเทาขาวประมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ซึ่งเรียกว่าเถ้าแกลบขาว [6] ส่วนเถ้าแกลบดำเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้า ที่ใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิงในการเผาที่เป็นแบบระบบปิด (Closed Burning Process) จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบพบว่า สารประกอบหลักที่สำคัญคือ ซิลิกา ซึ่งมีปริมาณมากกว่าร้อยละ 90 และการเผาที่อุณหภูมิที่พอเหมาะสมจะทำให้ซิลิกาอยู่ในรูปอสัณฐาน (Amorphous) ซึ่งมีความว่องไวต่อการทำปฏิกิริยา เถ้าแกลบที่ผ่านการบดให้ละเอียดจึงสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลานได้ดี [2], [6] คอนกรีตที่ผสมวัสดุปอซโซลาน มีข้อด้อยในส่วนของกำลังอัดระยะต้นที่ต่ำ โดยเฉพาะเถ้าชีวมวลที่ได้จากการเผาวัสดุทางการเกษตรต่าง ๆ เถ้าแกลบถือเป็นเถ้าชีวมวลที่มีสมบัติทางเคมีที่ดีเนื่องจากมีปริมาณของซิลิกาที่สูง แต่มีลักษณะทางกายภาพที่ไม่ดี เช่น มีอนุภาคที่หยาบ ความพรุนสูง ดูดน้ำมาก เป็นต้น ซึ่งทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้ไม่ดีและให้กำลังอัดค่อนข้างต่ำ จนไม่สามารถนำมาใช้งานในทางวิศวกรรมได้ อย่างไรก็ตาม ถ้ามีการใช้ด่างที่เป็นสารเร่งปฏิกิริยา ในการชะเอาซิลิกาและอลูมินาจากเถ้าแกลบ [7], [8] เพื่อเข้าทำปฏิกิริยาปอซโซลานกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ อาจส่งผลให้การเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบได้สมบูรณ์มากขึ้น และทำให้คอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบมีการพัฒนากำลังอัดได้ดีขึ้น ซึ่งอาจไม่ต้องบดเถ้าแกลบให้ละเอียดมากนัก ดังนั้นการวิจัยในครั้งนี้ จึงมีจุดประสงค์เพื่อใช้ด่างที่มีความเข้มข้นต่างกันในการเร่งปฏิกิริยาปอซโซลานในคอนกรีตผสมเถ้าแกลบที่มีความละเอียดต่ำ (มีความละเอียดค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 30) ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในปริมาณสูง เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาสมบัติเชิงกลของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ ให้สามารถรับแรงเชิงกลได้ดี และศึกษาความเป็นไปได้ในการนำมาใช้งานในเชิงพาณิชย์โดยไม่ต้องผ่านการบดให้ละเอียดมาก

2. วิธีการศึกษา

2.1 วัสดุประสาน

วัสดุประสานที่ในการศึกษาครั้งนี้ประกอบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐาน ASTM C150 [9] สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) (ใช้เป็น

ด่างเร่งปฏิกิริยา) และเถ้าแกลบดำบดที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.09 สำหรับองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบดำที่ผ่านการบด มีปริมาณของ SiO_2 สูงถึงร้อยละ 90 ซึ่งส่งผลดีต่อการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสานแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน

องค์ประกอบทางเคมี (%)	ร้อยละโดยน้ำหนัก (%)	
	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1	เถ้าแกลบ (RHA)
Silicon dioxide, SiO_2	20.10	90.0
Aluminum oxide, Al_2O_3	5.20	0.5
Iron oxide, Fe_2O_3	3.15	2.0
Calcium oxide, CaO	60.24	0.5
Magnesium oxide, MgO	1.13	0.2
Sulfur trioxide, SO_3	2.42	1.5
Other oxides	1.52	-
LOI.	2.03	4.71

2.2 มวลรวม

มวลรวมละเอียดใช้ทรายแม่น้ำที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 มีความถ่วงจำเพาะรวมเท่ากับ 2.65 ร้อยละการดูดซึมน้ำเท่ากับ 0.70 และโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.67 ส่วนมวลรวมหยาบใช้เป็นหินปูนย่อยขนาดใหญ่สุดของมวลรวมเท่ากับ 19 มม. (หินเบอร์ ¾ นิ้ว) มีความถ่วงจำเพาะรวมเท่ากับ 2.69 ร้อยละการดูดซึมน้ำเท่ากับ 0.50 และโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.69

2.3 การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบ

2.3.1 ส่วนผสมคอนกรีต

การศึกษานี้ใช้คอนกรีตที่มีอัตราส่วนของเหลว (สารละลาย NaOH) ต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 และใช้เถ้าแกลบที่บดละเอียดจนมีอนุภาคที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 40, 50 และ 60 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน โดยควบคุมค่ายุบตัวของคอนกรีตให้อยู่ในช่วง 5–10 ซม. หากค่ายุบตัวของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบดำไม่อยู่ในช่วงที่กำหนด จะใช้สารลดน้ำพิเศษประเภทซัลโฟเนตเมลามีนฟอร์มาดีไฮด์คอนเดนเซตช่วยในการเพิ่มความสามารถเทได้ ส่วนผสมคอนกรีตควบคุม และส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ด่าง NaOH เร่งปฏิกิริยาแสดงดังตารางที่ 2 และ 3 ตามลำดับ

ตารางที่ 2 ส่วนผสมคอนกรีตควบคุม

ส่วนผสม	ส่วนผสมคอนกรีต (กก./ม.^{3})					W/B
	ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1	เถ้าแกลบ (RHA)	ทราย	หิน	น้ำ	
I	478	-	639	1,024	239	0.50
IR40	287	191	639	1,004	239	0.50
IR50	239	239	639	990	239	0.50
IR60	191	278	639	977	239	0.50

ตารางที่ 3 ส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ด่าง NaOH เร่งปฏิกิริยา

ส่วนผสม	ส่วนผสมคอนกรีต (กก./ม.^{3})					ความเข้มข้นของ NaOH (โมลาร์)
	ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1	เถ้าแกลบ (RHA)	ทราย	หิน	สารละลาย NaOH	
IR40-0.5M	287	191	639	1,004	239	0.5
IR50-0.5M	239	239	639	990	239	0.5
IR60-0.5M	191	278	639	977	239	0.5
IR40-1M	287	191	639	1,004	239	1.0
IR50-1M	239	239	639	990	239	1.0
IR60-1M	191	278	639	977	239	1.0
IR40-1.5M	287	191	639	1,004	239	1.5
IR50-1.5M	239	239	639	990	239	1.5
IR60-1.5M	191	278	639	977	239	1.5

2.3.2 การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบ

ทำการหล่อคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 100 × 100 × 100 มม.^{3} ตามมาตรฐาน BS 1881 [10] เพื่อใช้ทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต ในการหล่อตัวอย่างคอนกรีต ได้ผสมเถ้าแกลบกับสารละลาย NaOH ทิ้งไว้เป็นเวลา 10 นาที

เพื่อให้เกิดการชะชิลิกาจากเถ้าแกลบ และทำการผสมส่วนผสมอื่นๆ ตามส่วนผสมในตารางที่ 2 และ 3 หล่อตัวอย่างคอนกรีตและถอดแบบที่อายุ 24 ชม. หลังจากนั้นบ่มตัวอย่างคอนกรีตในน้ำ จนถึงอายุทดสอบกำลังอัด โดยทำการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตหลังบ่มตัวอย่างในน้ำที่อายุ 7, 14, 28 และ 60 วัน โดยเฉลี่ยกำลังอัดของคอนกรีตจากการทดสอบตัวอย่าง 3 ก้อน รูปที่ 1 แสดงการเตรียมตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้

3. การวิเคราะห์ผลการทดสอบ

3.1 การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีต

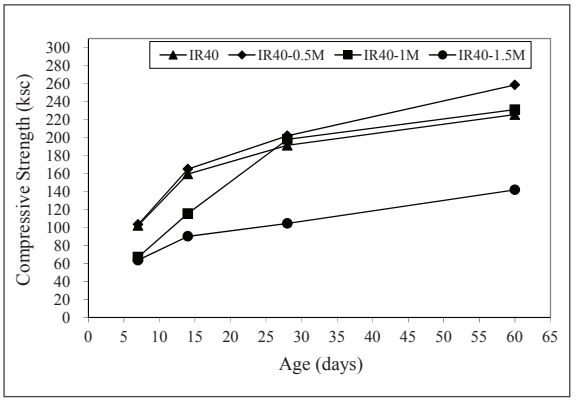
เมื่อพิจารณาการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีต ตามระยะเวลาของการบ่มคอนกรีต ดังตารางที่ 4 และรูปที่ 2(ก) 2(ข) และ 2(ค) ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบร้อยละ 40, 50 และ 60 โดยน้ำหนักวัสดุประสานกับระยะเวลาบ่ม ตามลำดับ พบว่าทุกส่วนผสมมีกำลังอัดเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาบ่มที่มากขึ้น โดยมีการพัฒนากำลังอัดในช่วง 14 วันแรก สูงกว่าช่วง 14 วันถึง 60 วัน (สังเกตจากความชันของกราฟในช่วง 14 วันแรกจะมีความชันมากกว่า 14–60 วัน) ในช่วงอายุต้นของการบ่มกำลังอัดของคอนกรีตจะขึ้นกับปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับน้ำเป็นหลัก จึงทำให้อัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดคอนกรีตในช่วง 7 วันแรกไม่แตกต่างกันมาก หลังจากนั้นคอนกรีตเริ่มเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานมีผลให้การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เริ่มมีผลต่อกำลังอัดของคอนกรีต จากการศึกษาครั้งนี้พบว่าการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดในกลุ่มที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เร่งปฏิกิริยาในช่วง 0.5 ถึง 1.0 โมลาร์ มีแนวโน้มให้การพัฒนากำลังอัดดีขึ้น เช่น คอนกรีตที่ใช้เถ้าแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 40 และใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0, 0.5, 1.0 และ 1.5 โมลาร์ มีร้อยละของกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เทียบกับอายุ 7 วัน เท่ากับ 187, 195, 295 และ 164 ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม เมื่อใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์สูงกว่า 1.0 โมลาร์ พบว่า การพัฒนากำลังอัดมีแนวโน้มลดลง อาจเป็นผลจากความหนืดที่เพิ่มมากขึ้น ตามความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ส่งผลให้คอนกรีตมีการยึดประสานภายในส่วนผสมต่ำลง และทำให้กำลังอัดของคอนกรีตต่ำลงด้วย [11], [12] ดังนั้นที่ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ในช่วง 0.5 ถึง 1.0 โมลาร์ จึงมีความเหมาะสมเพื่อใช้เร่งปฏิกิริยาปอซโซลานในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ เนื่องจากให้การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตในทิศทางที่ดี นอกจากนี้ อัตราส่วนการแทนที่

(ก) ผสมเถ้าแกลบกับ NaOH ทิ้งไว้เป็นเวลา 10 นาที

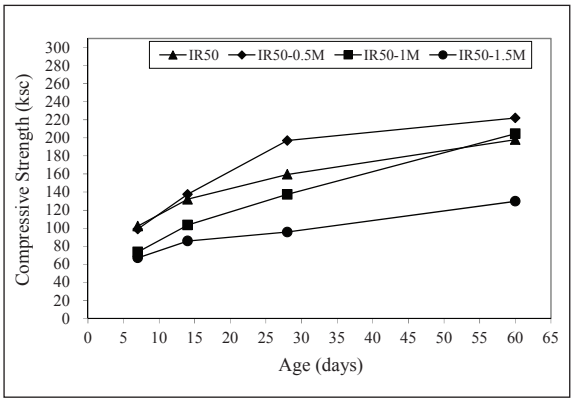
(ข) เทคอนกรีตในแบบหล่อ

(ค) บ่มตัวอย่างคอนกรีตในน้ำ

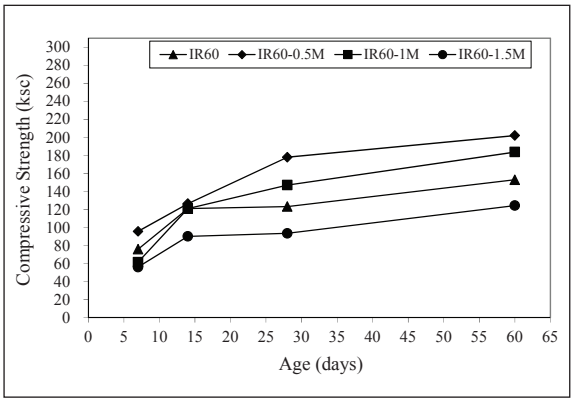
รูปที่ 1 การเตรียมตัวอย่างคอนกรีตเพื่อทดสอบกำลังอัด



(ก) คอนกรีตผสมเถ้าแกลบร้อยละ 40



(ข) คอนกรีตผสมเถ้าแกลบร้อยละ 50



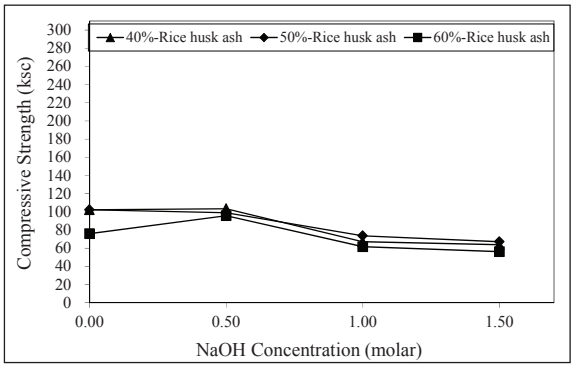
(ค) คอนกรีตผสมเถ้าแกลบร้อยละ 60

รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตกับอายุบ่มคอนกรีต

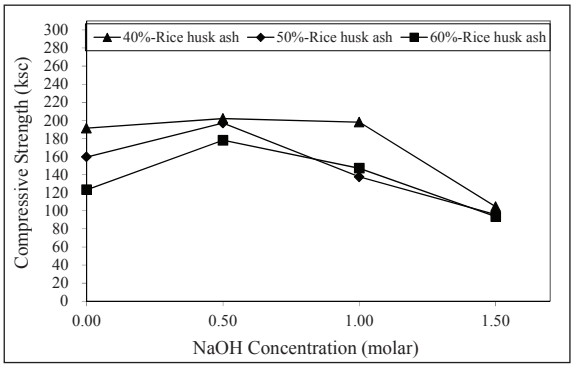
เถ้าแกลบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ยังเป็นปัจจัยหลักในการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตโดย พบว่าคอนกรีตที่มีการแทนที่ของเถ้าแกลบในอัตราร้อยละ 40 ให้กำลังอัดสูงที่สุด ซึ่งเป็นเพราะการแทนที่ของเถ้าแกลบในอัตราร้อยละ 40 มีปริมาณปูนซีเมนต์สูง ปฏิกิริยาไฮเดรชันจึงเกิดได้ดี โดยภาพรวมแล้วการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตในทุกส่วนผสม มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการบ่ม และไม่แตกต่างกันมากนักในกลุ่มที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ในการกระตุ้นไม่เกิน 1.0 โมลาร์ ส่วนกลุ่มที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่มีความเข้มข้นสูงถึง 1.5 โมลาร์ พบว่ามีแนวโน้มทำให้การพัฒนากำลังอัดช้ากว่ากลุ่มอื่นๆ ยิ่งเพิ่มความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์สูงมากขึ้นยิ่งมีผลเสียมากขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่มีความเข้นข้นสูงกว่า 1.0 โมลาร์ ไม่เหมาะสมในการใช้ผสมคอนกรีต เพื่อปรับปรุงกำลังอัด เพราะนอกจากจะให้กำลังอัดที่ต่ำแล้ว ยังส่งผลต่อต้นทุนการผลิตที่สูงขึ้นด้วย

ตารางที่ 4 กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบและใช้สารละลาย NaOH เร่งปฏิกิริยา ที่อายุ 7, 14, 28 และ 60 วัน

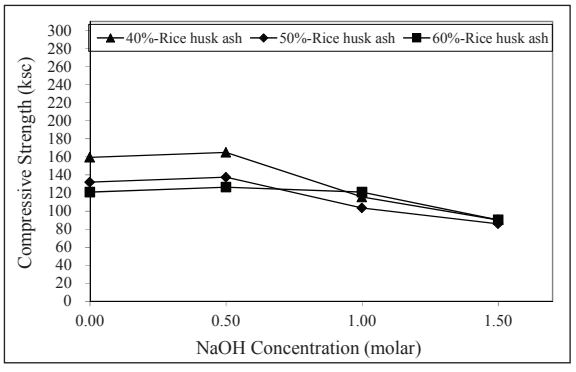
ส่วนผสม	กำลังอัดของคอนกรีต (กก./ซม.^{2})				ร้อยละกำลังอัดของคอนกรีตเทียบกับอายุ 7 วัน			
	7 วัน	14 วัน	28 วัน	60 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	60 วัน
IR40	102	160	191	226	100	156	187	220
IR40-0.5M	103	165	202	259	100	160	195	250
IR40-1.0M	67	116	198	231	100	172	295	344
IR40-1.5M	64	90	105	142	100	141	164	222
IR50	102	132	160	198	100	129	156	194
IR50-0.5M	99	138	197	222	100	139	199	224
IR50-1.0M	74	103	138	205	100	140	187	278
IR50-1.5M	67	86	96	130	100	128	143	193
IR60	76	121	123	153	100	159	162	201
IR60-0.5M	96	127	178	202	100	132	186	211
IR60-1.0M	62	121	147	184	100	196	239	298
IR60-1.5M	56	90	94	124	100	161	167	222



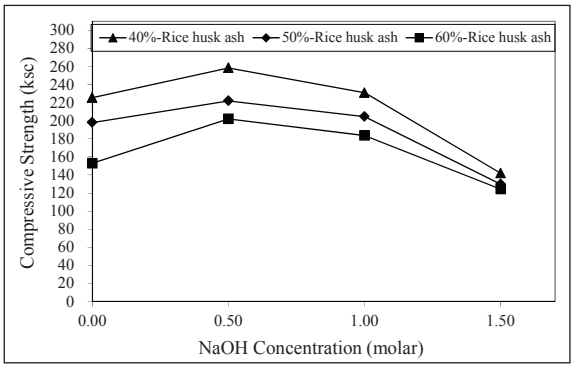
(ก) อายุบ่มคอนกรีต 7 วัน



(ค) อายุบ่มคอนกรีต 28 วัน



(ข) อายุบ่มคอนกรีต 14 วัน



(ง) อายุบ่มคอนกรีต 60 วัน

รูปที่ 3 ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังอัดของคอนกรีต

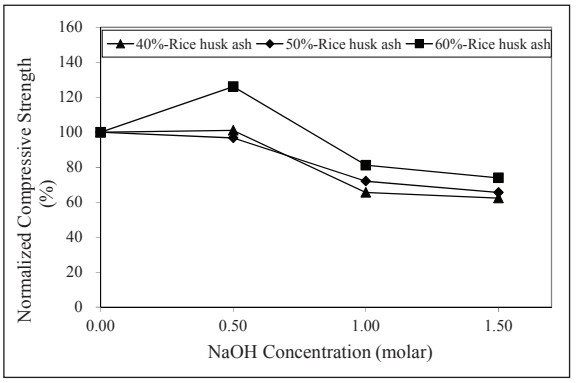
3.2 ผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่อกำลังอัดของคอนกรีต

เมื่อพิจารณาผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่อกำลังอัดของคอนกรีต ดังแสดงในรูปที่ 3 พบว่าในทุกกลุ่มการแทนที่ของเถ้าแกลบที่ใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 0.5 โมลาร์ ให้กำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมสารละลาย NaOH ในทุกอายุการทดสอบ และมีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจน เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย NaOH สูงขึ้น ซึ่งผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่ 0.5 โมลาร์ มีความเหมาะสมในการชะเอาซิลิกาออกจากเถ้าแกลบเพื่อเข้าทำปฏิกิริยาปอซโซลานกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน การลดลงของกำลังอัดคอนกรีตเมื่อใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นสูงขึ้นอาจเป็นผลจากความเข้มข้นของ NaOH ที่สูงเกินไป อาจเหลือจากการชะเอาซิลิกาจากเถ้าแกลบ ซึ่งลักษณะโดยทั่วไปของ NaOH เมื่อเจอความชื้นจะทำให้มีความหนืดมากขึ้นและส่งผลให้แรงยึดเกาะ ภายในเนื้อคอนกรีตลดต่ำลง ส่งผลให้กำลังของคอนกรีตลดลงได้ [11]–[14] เช่น กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบร้อยละ 40 และใช้สารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 0, 0.5, 1.0 และ 1.5 โมลาร์ ให้กำลังอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 191, 202, 198 และ 105 กก./ซม.^{2} ตามลำดับ

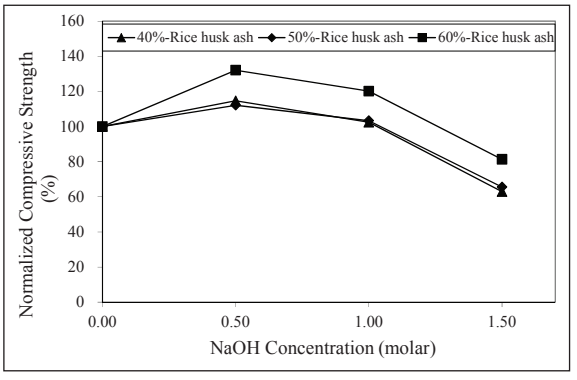
การใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 0.5 โมลาร์ มีผลต่อการเพิ่มกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าแกลบในปริมาณสูงมากกว่าปริมาณต่ำ เช่น คอนกรีต

ที่ผสมเถ้าแกลบร้อยละ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และใช้สารละลาย NaOH เข้มข้นเท่ากับ 0.5 โมลาร์ มีกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เพิ่มขึ้นเท่ากับ 11 กก./ซม.^{2} (เพิ่มจาก 191 กก./ซม.^{2} ในคอนกรีต IR40 เป็น 202 กก./ซม.^{2} ในคอนกรีต IR40-0.5M) ส่วนกลุ่มที่ใช้เถ้าแกลบปริมาณสูง ที่ใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นเดียวกัน มีกำลังอัดเพิ่มขึ้นถึง 55 กก./ซม.^{2} (เพิ่มจาก 123 กก/ซม.^{2} ในคอนกรีต IR60 เป็น 178 กก./ซม.^{2} ในคอนกรีต IR60-0.5M) ซึ่งแสดงให้เห็นว่า สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ มีผลต่อกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบในปริมาณสูงมากกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบในปริมาณต่ำ ทั้งนี้อาจเป็นผลจากการใช้เถ้าแกลบในปริมาณสูง ส่งผลให้ซิลิกาที่ถูกชะโดยสารละลาย NaOH มีปริมาณมากขึ้น และเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานที่ส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตสูงขึ้นได้ [12], [13], [15] การศึกษาครั้งนี้พบว่าที่อายุคอนกรีตนานขึ้นเป็น 60 วัน มีผลทำให้คอนกรีตกลุ่มที่ใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้น 1.0 โมลาร์ มีกำลังอัดสูงกว่ากลุ่มควบคุมเล็กน้อย โดยในคอนกรีตควบคุมที่ผสมเถ้าแกลบร้อยละ 40, 50 และ 60 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีกำลังอัดที่อายุ 60 วัน เท่ากับ 226, 198 และ 153 กก./ซม.^{2} ตามลำดับ และกำลังอัดเพิ่มขึ้นเป็น 231, 205 และ 184 กก./ซม.^{2} ตามลำดับ เมื่อใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 1.0 โมลาร์ อย่างไรก็ตามการใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 1.0 โมลาร์ ถึงแม้จะให้กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 60 วัน สูงกว่ากลุ่มควบคุมแต่กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุต้นค่อนข้างต่ำและต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม จึงไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นส่วนผสมเพื่อใช้ในงานก่อสร้าง ประกอบกับการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 0.50 โมลาร์ ให้กำลังอัดที่สูงกว่าค่อนข้างชัดเจน และที่ความเข้มข้นที่ต่ำกว่าทำให้ต้นทุนการผลิตคอนกรีตลดลงได้

เมื่อพิจารณาผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่อกำลังอัดของคอนกรีต ในรูปของร้อยละกำลังอัดเทียบกับกลุ่มควบคุม (Normalized Compressive Strength) ของคอนกรีตที่อายุ 7 และ 60 วัน ดังรูปที่ 4(ก) และ 4(ข) ตามลำดับ พบว่า ความเข้มข้นของสารละลาย



(ก) อายุบ่มคอนกรีต 7 วัน



(ข) อายุบ่มคอนกรีต 60 วัน

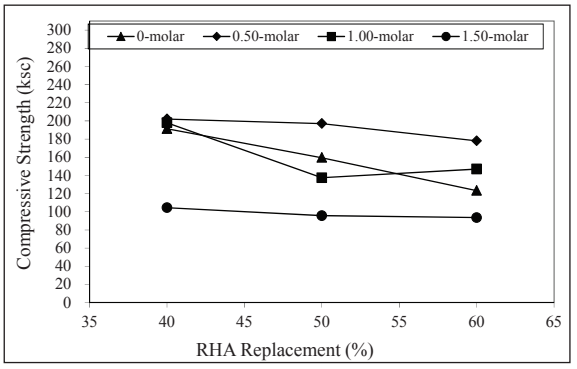
รูปที่ 4 ผลของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อร้อยละกำลังอัดของคอนกรีตเทียบกับกลุ่มควบคุม

NaOH ที่ 0.5 โมลาร์ ของทุกกลุ่มการแทนที่ด้วยเถ้าแกลบมีค่าร้อยละกำลังอัดของคอนกรีตเทียบกับกลุ่มควบคุมมากกว่าร้อยละ 100 และมีแนวโน้มลดลงที่ความเข้มข้นเท่ากับ 1.0 และ 1.5 โมลาร์ โดยมีค่าร้อยละของกำลังอัดเทียบกับกลุ่มควบคุมต่ำกว่าร้อยละ 100 โดยเฉพาะที่อายุต้นๆ ของคอนกรีต [รูปที่ 4 (ก)] ซึ่งแสดงชัดเจนมากขึ้นว่าการใช้สารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ ส่งผลดีต่อการปรับปรุงกำลังอัดของคอนกรีต และดีกว่ากลุ่มควบคุม โดยเฉพาะในกลุ่มที่ใช้เถ้าแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในปริมาณสูง (ร้อยละ 60) โดยให้ผลในทิศทางเดียวกันทั้งที่อายุต้น [รูปที่ (4ก)] และอายุมากขึ้นเป็น 60 วัน [รูปที่ 4 (ข)] เช่น ร้อยละของ

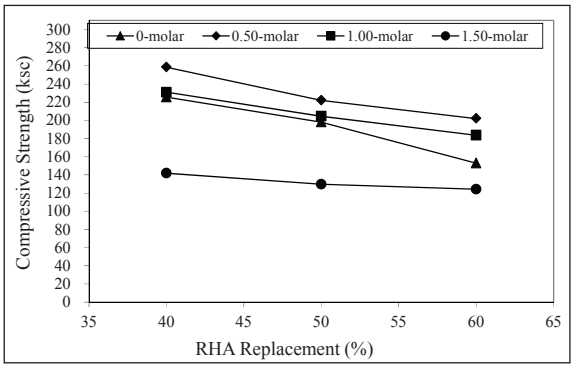
กำลังอัดของคอนกรีตเมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุม ที่อายุ 7 และ 60 วัน ที่ใช้เถ้าแกลบร้อยละ 60 และใช้สารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ มีค่าเท่ากับร้อยละ 126 และ 132 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาที่อายุมากขึ้นเป็น 60 วัน พบว่า คอนกรีตที่ใช้สารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้นมากขึ้นเป็น 1.0 โมลาร์ มีร้อยละของกำลังอัดเทียบกับกลุ่มควบคุมสูงกว่าร้อยละ 100 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นสูงขึ้นเป็น 1.0 โมลาร์ เริ่มมีผลดีต่อปฏิกิริยาปอซโซลานในระยะเวลาที่นานขึ้น และทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดสูงกว่ากลุ่มควบคุมได้ โดยคอนกรีตที่แทนที่เถ้าแกลบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 40, 50 และ 60 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และใช้สารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้นเท่ากับ 1.0 โมลาร์ มีร้อยละของกำลังอัดที่อายุ 60 วัน เทียบกับกลุ่มควบคุมเท่ากับ 102, 103 และ 120 ตามลำดับ

3.3 ผลของปริมาณเถ้าแกลบต่อกำลังอัดของคอนกรีต

เมื่อพิจารณาผลของปริมาณการแทนที่เถ้าแกลบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ต่อกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุการบ่ม 28 และ 60 วัน ดังรูปที่ 5(ก) และ 5(ข) ตามลำดับ พบว่าการแทนที่เถ้าแกลบในปริมาณที่มากขึ้น มีผลต่อการลดลงของกำลังอัดของคอนกรีต โดยเห็นผลชัดเจนในคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมด่างเร่งปฏิกิริยา เช่น คอนกรีตที่ไม่ได้ใช้ด่างเร่งปฏิกิริยาและผสมเถ้าแกลบเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 40 เป็นร้อยละ 60 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีผลให้กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน ลดลงเท่ากับ 68 กก./ซม.^{2} (ลดลงจาก 191 กก./ซม.^{2} ในคอนกรีต IR40 เป็น 123 กก./ซม.^{2} ในคอนกรีต IR60) ในขณะที่คอนกรีตกลุ่มเดียวกันนี้ที่ใช้สารละลาย NaOH เข้มข้นเท่ากับ 0.50 โมลาร์ในการเร่งปฏิกิริยาปอซโซลาน พบว่ามีผลให้กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน ลดลงแค่ 24 กก./ซม.^{2} (ลดลงจาก 202 กก./ซม.^{2} ในคอนกรีต IR40-0.5M เป็น 178 กก./ซม.^{2} ในคอนกรีต IR60-0.5M) และมีแนวโน้มเหมือนกันในคอนกรีตทุกอายุการบ่ม ผลดังกล่าวอาจเกิดจากปริมาณเถ้าแกลบที่สูงขึ้นในคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมด่างเร่งปฏิกิริยา ทำให้ลดปริมาณของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ลง ซึ่งมีผลทำให้กำลังอัดที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำลดลงด้วย [16]–[18] ประกอบกับเถ้าแกลบที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ มีอนุภาคค่อนข้างหยาบ (ค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 30) และใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในปริมาณสูง ทำให้ปฏิกิริยาปอซโซลานที่ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดคอนกรีตน้อยกว่าผลของปฏิกิริยาไฮเดรชัน ดังนั้นการเพิ่มขึ้นของปริมาณเถ้าแกลบ จึงมีผลชัดเจนต่อการลดลงของกำลังอัดคอนกรีตด้วย อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาในกลุ่มที่ใช้สารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ พบว่ามีผลทำให้ปฏิกิริยาปอซโซลานสมบูรณ์และให้กำลังอัดดีขึ้น ซึ่งสังเกตจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณเถ้าแกลบใน



(ก) อายุบ่มคอนกรีต 28 วัน



(ข) อายุบ่มคอนกรีต 60 วัน

รูปที่ 5 ผลของปริมาณเถ้าแกลบต่อกำลังอัดของคอนกรีต

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลงน้อยกว่ากลุ่มที่ไม่ใช้ด่างเร่งปฏิกิริยา ซึ่งผลดังกล่าวเกิดจากสารละลาย NaOH สามารถชะเอาซิลิกาจากเถ้าแกลบมาทำปฏิกิริยาปอซโซลานกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์และได้เป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต ที่ให้กำลังกับคอนกรีตได้ดีขึ้น [6], [19] แสดงให้เห็นว่า สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นเหมาะสม สามารถใช้เร่งปฏิกิริยาปอซโซลานในคอนกรีตที่ผสมวัสดุปอซโซลานได้

4. สรุป

จากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

1) เมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มสูงขึ้นไม่เกิน 0.5 โมลาร์ ส่งผลให้คอนกรีตผสมเถ้าแกลบในทุกกลุ่มการแทนที่มีกำลังอัดเพิ่มขึ้น โดยที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 0.5 โมลาร์ ทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดสูงที่สุด และมีผลชัดเจนต่อการเพิ่มกำลังอัดให้กับคอนกรีตที่ใช้เถ้าแกลบในปริมาณสูงมากกว่าปริมาณต่ำ และเมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มากกว่า 0.5 โมลาร์ กลับทำให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลงอย่างชัดเจน และลดลงต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมที่ไม่ได้ผสมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

2) เมื่ออายุบ่มคอนกรีตนานขึ้นถึง 60 วัน พบว่าการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 1.0 โมลาร์ มีผลทำให้กำลังอัดคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบสูงกว่ากลุ่มควบคุม

3) การศึกษาครั้งนี้พบว่า การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ และผสมเถ้าแกลบในปริมาณร้อยละ 60 โดยน้ำหนักวัสดุประสานมีความเหมาะสมในการพัฒนาเพื่อใช้เป็นวัสดุประสานในงานก่อสร้างมากที่สุด เนื่องจากสามารถปรับปรุงกำลังอัดของคอนกรีตให้มีค่าสูงกว่ากลุ่มควบคุม และการใช้เถ้าแกลบในปริมาณสูงทำให้ต้นทุนในการผลิตคอนกรีตต่ำลงได้ อย่างไรก็ตาม พบว่าการใช้สารละลาย NaOH ในการเร่งปฏิกิริยาในวัสดุประสานที่ใช้เถ้าแกลบดำที่มีความละเอียดต่ำในครั้งนี้ ยังไม่เหมาะสมที่จะใช้เป็นคอนกรีตโครงสร้าง เนื่องจากให้กำลังอัดค่อนข้างต่ำ

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ ทุนสนับสนุนการวิจัยจาก สำนักบริหารโครงการส่งเสริมการวิจัยในอุดมศึกษาและพัฒนามหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2558 (HERP)

เอกสารอ้างอิง

[1] *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*, ASTM C 618-00, 2001.

[2] P. Chindaprasirt and C. Jaturapitakkul, *Cement, Pozzolan and Concrete, 5th ed*. Thailand Concrete Association, 2008, pp. 11–13 and pp. 238–240 (in Thai).

[3] W. Chalee and C. Jaturapitakkul, "Threshold chloride content of fly ash concrete under marine environment," *Journal of Industrial Technology*, vol. 7, no. 1, pp. 21–28, 2007 (in Thai).

[4] P. Paisitsrisawat and U. Rattanasak, "Effect of silica fume on properties of fluidized combustion (FBC) fly ash geopolymer," *The Journal of Industrial Technology*, vol. 9, no. 9, pp. 40–48, 2013 (in Thai).

[5] T. Cheewaket, C. Jaturapitakkul, and W. Chalee, "Concrete durability presented by acceptable chloride level and chloride diffusion coefficient in concrete—10-year results in marine site," *Materials and Structures*, vol. 47, pp. 1501–1511, 2014.

[6] U. Rattanasak and P. Chindaprasirt, *Rice Husk Ash In Concrete*, 1th ed. Thailand Concrete Association, 2010, pp. 136 (in Thai).

[7] U. Rattanasak, W. Chalee, and P. Chindaprasirt,

"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).

[8] B.M. Bahadure and N.S. Naik, "Effect of alkaline activator on workability and compressive strength of cement concrete with RHA," *International Journal of Computational Engineering Research*, vol. 3, no. 5, pp. 505–514, 2013.

[9] *Standard Specification for Portland Cement*, ASTM C150 / C150M, 2012.

[10] *Testing concrete*, *Method for determination of compressive strength of concrete cubes*, BS 1881-116, 1983.

[11] C. Sanawong, K. 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).

[12] 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.

[13] S. Thaiwitcharoen and U. Rattanasak, "Study of the NaOH concentration and aluminium compound on the ettringite formation in fluidized bed combustion (FBC) fly ash geopolymer," *The Journal of Industrial Technology*, vol. 8, no. 3, pp. 1–8, 2011 (in Thai).

[14] K. Kuennokkhum, W. Koraviyothin, and W. Chalee, "Effect of NaOH concentration on water flow rate and compressive strengths of fly ash-based geopolymer porous concrete," *The Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok*, vol. 24, no. 1, pp. 56–65 (in Thai).

[15] C. Sanawong and W. Chalee. "Chloride penetration of fly ash-based geopolymer concrete under marine environment," *The Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok*, vol. 21, no. 2, pp. 257–265, 2011 (in Thai).

[16] P. Chindaprasirt, S. Homwuttiwong, and C. Jaturapitakkul, "Strength and water permeability of concrete containing palm oil fuel ash and rice husk–bark ash," *Construction and Building Materials*, vol. 21, pp. 1492–1499, 2007.

[17] W. Chalee, T. Sasakul, P. Suwanmaneechot, and C. Jaturapitakkul, "Utilization of rice husk-bark ash to improve the corrosion resistance of concrete under 5-year exposure in a marine environment," *Cement and Concrete Composites*, vol. 37, pp. 47–53, 2013.

[18] Q. Feng, H. Yamamichi, and C. Shoya, "Study on the pozzolanic properties of rice husk ash by hydrochloric acid pretreatment," *Cement and Concrete Research*, vol. 34, pp. 521–526, 2004.

[19] 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).