บทความวิจัย

ผลของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน

Reaksmey Soeurt และ วิเชียร ชาลี*
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 08–9791–5171 อีเมล: wichian@buu.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2017.11.013
รับเมื่อ 3 สิงหาคม 2559 ตอบรับเมื่อ 28 กันยายน 2559 เผยแพร่ออนไลน์ 15 พฤศจิกายน 2560
© 2017 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่ใช้เป็นด่างเร่งปฏิกิริยา ต่อกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน โดยแทนที่เถ้าถ่านหินในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 40, 50 และ 60 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และใช้ NaOH ที่มีความเข้มข้น 0.00, 0.25, 0.50 และ 0.75 โมลาร์ เป็นด่างเร่งปฏิกิริยา หล่อตัวอย่างคอนกรีตขนาด 100×100×100 มม^3 หลังจากนั้นนำตัวอย่างคอนกรีตไปบ่มในน้ำ และทดสอบกำลังอัดที่อายุ 3, 7, 14, 28 และ 60 วัน ผลการศึกษาพบว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินมีแนวโน้มสูงขึ้น เมื่อใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นไม่เกิน 0.50 โมลาร์ การใช้เถ้าถ่านหินผสมในคอนกรีตในปริมาณที่สูงขึ้น มีผลต่อการลดกำลังอัดของคอนกรีตที่ไม่ได้ใช้สารละลาย NaOH มากกว่ากลุ่มที่ใช้สารละลาย NaOH การศึกษาครั้งนี้พบว่า การใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้น 0.50 โมลาร์ในกลุ่มที่ใช้เถ้าถ่านหินผสมในคอนกรีตร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสานมีความเหมาะสมในการนำไปใช้งานคอนกรีต เนื่องจากให้กำลังอัดสูงที่สุด โดยมีค่าเพิ่มขึ้นจากคอนกรีตควบคุมถึงร้อยละ 22 ที่อายุ 28 วัน

คำสำคัญ: เถ้าถ่านหิน, ด่างเร่งปฏิกิริยา, กำลังอัด, ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

การอ้างอิงบทความ: R. Soeurt และ วิเชียร ชาลี, “ผลของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน,” *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, ปีที่ 27, ฉบับที่ 4, หน้า 737–749, ต.ค.–ธ.ค. 2560

Research Article

The Influence of NaOH Concentration on Compressive Strength of Fly Ash Concrete

Reaksmey Soeurt and Wichian Chalee*
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.2017.11.013
Received 3 August 2016; Accepted 28 September 2016; Published online: 15 November 2017
© 2017 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

This research studied the influence of NaOH concentration on the compressive strength of fly ash concrete. Fly ash was used to replace Portland cement type I at the percentages of 40, 50, and 60 by weight of binder. Sodium hydroxide (NaOH) solution was introduced as an alkaline activator at various molar concentrations of 0.00, 0.25, 0.50, and 0.75 molar. Concrete cube specimens of 100×100×100 mm^3 had been cast. The specimens were cured in tab water for 3, 7, 14, 28, and 60 days and their compressive strengths were determined. Based on the results, compressive strength of fly ash concretes tended to increase as the concentration of NaOH solution increase for no more than 0.50 molar. Higher amount of fly ash in concretes also reduced their compressive strengths and a greater reduction was found in concretes without any activator of NaOH solution. In summary, the use of NaOH solution at 0.50 molar concentration in concrete containing fly ash at 50% by weight of binder would be optimal due to its highest compressive strength, which was 22% higher than that of the control concrete.

Keywords: Fly Ash, Alkaline Activator, Compressive Strength, Sodium Hydroxide Concentration

Please cite this article as: R. Soeurt and W. Chalee, "The influence of NaOH concentration on compressive strength of fly ash concrete," *The Journal of KMUTNB.*, vol. 27, no. 4, pp. 737–749, Oct.–Dec. 2017 (in Thai).

1. บทนำ

การใช้วัสดุปอซโซลานแทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เพื่อใช้ในงานคอนกรีต หรือมอร์ต้าร์ได้รับความนิยมมากขึ้น โดยมีการใช้งานวัสดุดังกล่าวเพื่อเพิ่มคุณสมบัติพิเศษให้กับคอนกรีต เช่น ความคงทน ลดความร้อนในคอนกรีต ลดการทำปฏิกิริยาของ Alkali-aggregate ต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟตได้ดีขึ้น เพิ่มความสามารถของการทำงานได้ ตลอดจนทำให้คอนกรีตมีต้นทุนการผลิตที่ลดลง [1], [2] นอกจากนั้นการใช้วัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เป็นการลดปริมาณของการใช้ปูนซีเมนต์ลง ซึ่งช่วยลดผลกระทบจากการผลิตปูนซีเมนต์ที่มีต่อสิ่งแวดล้อมอีกทางด้วย [3]

กลไกการเกิดปฏิกิริยาของวัสดุปอซโซลานในมอร์ต้าร์หรือคอนกรีต เป็นการเกิดปฏิกิริยาระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาไฮเดรชัน กับซิลิก้าหรืออลูมินา ที่ได้จากวัสดุปอซโซลาน ได้ผลิตภัณฑ์เป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต หรือแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรตที่ให้กำลังแก่คอนกรีตได้ [4]–[6] ปกติวัสดุปอซโซลานไม่มีสมบัติเป็นวัสดุประสานหรืออาจมีน้อย แต่สามารถให้สมบัติในการยึดประสานได้บ้างในวัสดุปอซโซลานที่มีองค์ประกอบของแคลเซียมออกไซด์สูงขึ้น [5], [6] ลักษณะทางกายภาพของวัสดุปอซโซลานที่ดีควรมีความละเอียดสูง ความพรุนต่ำและอนุภาคกลมตัน เพื่อให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสที่สูง ซึ่งทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานที่ให้กำลังอัดกับคอนกรีตสมบูรณ์มากขึ้น ตลอดจนอนุภาคที่เล็กและกลมตันยังช่วยให้เกิดการแทรกตัวอุดช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีต ทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำ ลดการแทรกซึมของสารเคมีที่เป็นอันตรายกับคอนกรีต ทำให้คอนกรีตที่ผสมวัสดุปอซโซลานมีความคงทนมากขึ้น [7]–[10] นอกจากนั้นวัสดุปอซโซลานที่มีปริมาณของซิลิก้าสูง สามารถเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานกับด่างในคอนกรีตได้สมบูรณ์ ทำให้มีกำลังอัดสูงขึ้นได้ [11] วัสดุปอซโซลานถูกใช้งานเพื่อแทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เพื่อใช้เป็นวัสดุประสานในงานคอนกรีต ให้มีสมบัติที่ดีขึ้น อย่างไรก็ตามการใช้วัสดุปอซโซลานยังมีข้อด้อยที่ทำให้กำลังอัดระยะต้นต่ำ เนื่องจากได้ลดปริมาณปูนซีเมนต์ลง [12] นอกจากนั้น วัสดุปอซโซลานบางชนิดพบว่า มีองค์ประกอบทางเคมีที่มีศักยภาพในการใช้งานทางวิศวกรรมสูง แต่ไม่สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลานในงานคอนกรีตได้ เนื่องจากมีอนุภาคที่หยาบ มีความพรุนสูง ดูดน้ำมาก ทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้ไม่สมบูรณ์ เช่น เถ้าชีวมวลต่าง ๆ (เถ้าแกลบ เถ้าแกลบเปลือกไม้ เถ้าปาล์มน้ำมัน เถ้าชานอ้อย) การนำวัสดุดังกล่าวนี้มาใช้งานจึงจำเป็นต้องบดให้ละเอียดก่อน [13]

จากกลไกการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานดังที่กล่าวมาข้างต้น พบว่า หากสามารถเร่งปฏิกิริยาระหว่างซิลิก้า หรืออลูมินากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ให้เกิดเร็วและสมบูรณ์มากขึ้น โดยการชะเอาซิลิก้าหรืออลูมินาออกจากวัสดุปอซโซลานก่อน เพื่อให้พร้อมที่จะเข้าทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ก็เป็นอีกแนวทางในการปรับปรุงสมบัติของวัสดุปอซโซลานให้สามารถใช้งานได้ดีขึ้น นอกเหนือจากการบดให้ละเอียด [14] งานวิจัยที่ผ่านมา [15] พบว่า การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นไม่เกิน 0.50 โมลาร์ เพื่อเร่งปฏิกิริยาในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ ทำให้กำลังอัดของคอนกรีตมีแนวโน้มสูงขึ้น โดยเห็นผลชัดเจนในกลุ่มที่ใช้เถ้าแกลบในปริมาณสูง (ร้อยละ 60 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน) นอกจากนั้นการศึกษาในต่างประเทศพบว่า การใช้ด่างเร่งปฏิกิริยามีผลต่อการพัฒนากำลังอัดของเพสต์ที่ผสมวัสดุปอซโซลานได้เป็นอย่างดี [16] โดยวิธีการนี้ได้รับความนิยมและมีประสิทธิภาพกว่าการบดให้ละเอียด หรือบ่มในอุณภูมิที่สูง [17] ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้ด่างที่มีความเข้มข้นต่างกันในการเร่งปฏิกิริยาปอซโซลาน ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในปริมาณสูง เพื่อปรับปรุงสมบัติการรับแรงของคอนกรีตให้ดีขึ้น โดยไม่ต้องผ่านการบดเพื่อปรับปรุงคุณภาพของเถ้าถ่านหิน

2. วิธีการวิจัย

2.1 มวลรวม

มวลรวมละเอียดใช้ทรายแม่น้ำที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 มีความถ่วงจำเพาะรวมเท่ากับ 2.65 ร้อยละการดูดซึมน้ำเท่ากับ 0.70 และโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.67

ส่วนมวลรวมหยาบใช้เป็นหินปูนย่อยขนาดใหญ่สุดของมวลรวมเท่ากับ 19 มม (หินเบอร์ ¾ นิ้ว) มีความถ่วงจำเพาะรวมเท่ากับ 2.72 ร้อยละการดูดซึมน้ำเท่ากับ 0.67 และโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.69

2.2 วัสดุประสาน

วัสดุประสานที่ในการศึกษาครั้งนี้ประกอบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐาน ASTM C150 [18] สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และเถ้าถ่านหิน ซึ่งใช้เถ้าถ่านหินที่ได้โดยตรงจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.23 และความละเอียดค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 31.2 โดยน้ำหนักซึ่งไม่เกินร้อยละ 34 โดยน้ำหนักซึ่งเป็นไปตามเกณฑ์ของมาตรฐาน ASTM C618 [19] สำหรับองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหิน มีผลรวมของสารประกอบหลัก SiO_2, Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เท่ากับร้อยละ 72.21 ซึ่งจัดเป็นเถ้าถ่านหินชนิด F ตามมาตรฐาน ASTM C 618 [19] องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสานแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน

องค์ประกอบทางเคมี (%)	ร้อยละโดยน้ำหนัก (%)	
	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1	เถ้าถ่านหิน (FA)
Silicon Dioxide, SiO_2	20.1	35.20
Aluminum Oxide, Al_2O_3	5.2	19.20
Iron Oxide, Fe_2O_3	3.15	17.81
Calcium Oxide, CaO	60.24	16.65
Magnesium Oxide, MgO	1.13	-
Sodium Oxide, Na_2O	0.11	0.63
Potassium Oxide, K_2O	0.43	2.44
Sulfur Trioxide, SO_3	2.42	1.50
LOI.	2.03	0.15

2.3 การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบ

2.3.1 ส่วนผสมคอนกรีต

การศึกษานี้ใช้คอนกรีตที่มีอัตราส่วนของเหลว (สารละลาย NaOH) ต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 และใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 40, 50 และ 60 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน โดยได้ทำการทดสอบหาค่ายุบตัวของคอนกรีต ซึ่งพบว่าให้ค่ายุบตัวไม่เกิน 20 ซม. การแทนที่เถ้าถ่านหินในปริมาณที่สูงขึ้นทำให้ค่ายุบตัวเพิ่มขึ้น เนื่องจากเถ้าถ่านหินมีรูปร่างกลมและผิวเรียบทำให้มีการไหลที่ดี ส่วนการใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นสูงขึ้น มีผลให้ลดค่ายุบตัวลงเล็กน้อย ส่วนผสมคอนกรีตควบคุมและคอนกรีตที่ใช้ด่าง NaOH เร่งปฏิกิริยา แสดงดังตารางที่ 2 และ 3 ตามลำดับ

ตารางที่ 2 ส่วนผสมคอนกรีตควบคุม

ส่วนผสม	ส่วนผสมคอนกรีต (กก./ม.^{3})					
	ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1	เถ้าถ่านหิน (FA)	ทราย	หิน	สารละลาย NaOH	W/B
IF40	252	168	819	920	190	0.45
IF50	210	210	800	920	190	0.45
IF60	168	252	785	920	190	0.45

ตารางที่ 3 ส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ด่าง NaOH เร่งปฏิกิริยา

ส่วนผสม	ส่วนผสมคอนกรีต (กก./ม.^{3})					
	ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1	เถ้าถ่านหิน (FA)	ทราย	หิน	สารละลาย NaOH	W/B
IF40 - 0.25 M	252	168	819	920	190	0.45
IF40 - 0.50 M	252	168	819	920	190	0.45
IF40 - 0.75 M	252	168	819	920	190	0.45
IF50 - 0.25 M	210	210	800	920	190	0.45
IF50 - 0.50 M	210	210	800	920	190	0.45
IF50 - 0.75 M	210	210	800	920	190	0.45
IF60 - 0.25 M	168	252	785	920	190	0.45
IF60 - 0.50 M	168	252	785	920	190	0.45
IF60 - 0.75 M	168	252	785	920	190	0.45

2.3.2 การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบ

ทำการหล่อคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 100×100×100 มม.[3] ตามมาตรฐาน BS 1881 [20] เพื่อใช้ทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต ในการหล่อตัวอย่างคอนกรีต ได้ผสมเถ้าถ่านหินกับสารละลาย NaOH ทิ้งไว้เป็นเวลา 10 นาที ดังรูปที่ 1 (ก) เพื่อให้เกิดการชะซิลิก้าจากเถ้าถ่านหิน และทำการผสมส่วนผสมอื่นๆ ตามส่วนผสมในตารางที่ 2 และ 3 หล่อตัวอย่างคอนกรีต ดังรูปที่ 1 (ข) และถอดแบบที่อายุ 24 ชม. หลังจากนั้นบ่มตัวอย่างคอนกรีตในน้ำ ดังรูปที่ 1 (ค) จนถึงอายุทดสอบกำลังอัด โดยทำการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 3, 7, 14, 28 และ 60 วัน โดยเฉลี่ยกำลังอัดของคอนกรีตจากการทดสอบตัวอย่าง 3 ตัวอย่าง

3. การวิเคราะห์ผลการทดสอบ

3.1 การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีต

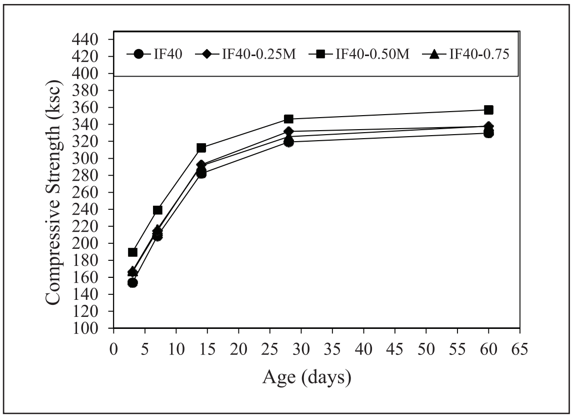
การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีต ตามระยะเวลาของการบ่มคอนกรีตแสดงดังตารางที่ 4 และรูปที่ 2 (ก), 2 (ข) และ 2 (ค) ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 40, 50 และ 60 โดยน้ำหนักวัสดุประสานกับระยะเวลาบ่ม ตามลำดับ พบว่าทุกส่วนผสมมีกำลังอัดเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาบ่มที่มากขึ้น โดยมีการพัฒนากำลังอัดในช่วง 14 วันแรก สูงกว่าช่วง 14 วันถึง 60 วัน (สังเกตจากความชันของกราฟในช่วง 14 วันแรกจะมีความชันมากกว่า 14–60 วัน) ในช่วงอายุต้นของการบ่มกำลังอัดของคอนกรีตจะขึ้นกับปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับน้ำเป็นหลัก จึงทำให้อัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดคอนกรีตในช่วง 7 วันแรกไม่แตกต่างกันมาก หลังจากนั้นคอนกรีตเริ่มเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน มีผลให้การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เริ่มมีผลต่อกำลังอัดของคอนกรีต อย่างไรก็ตาม ปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าถ่านหินในคอนกรีตเกิดขึ้นช้าและต้องใช้เวลานาน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Bahadure และ Naik [14] ที่แสดงถึงผลของวัสดุปอซโซลานต่อการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตที่อายุบ่มต่างๆ โดยพบว่าการบ่มคอนกรีตเป็นปัจจัยที่สำคัญที่ทำให้คอนกรีตผสม

(ก) ผสมเถ้าถ่านหินกับ NaOH ทิ้งไว้เป็นเวลา 10 นาที

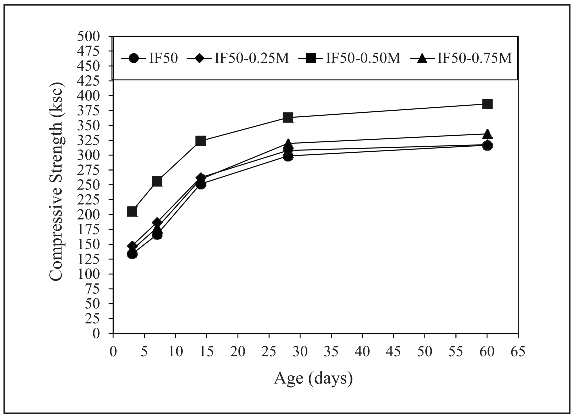
(ข) เทคอนกรีตในแบบหล่อ

(ค) บ่มตัวอย่างคอนกรีตในน้ำ

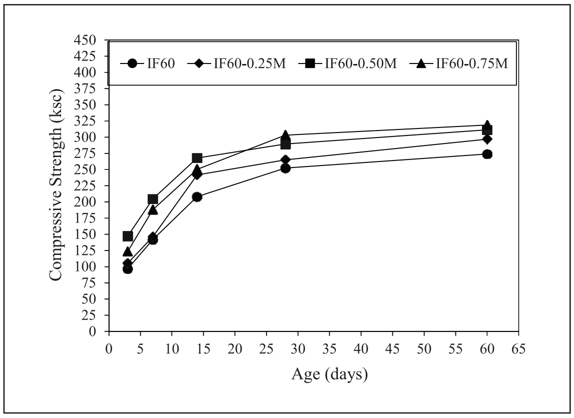
รูปที่ 1 การเตรียมตัวอย่างคอนกรีตเพื่อทดสอบกำลังอัด



(ก) คอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 40



(ข) คอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 50



(ค) คอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 60

รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตกับอายุบ่มคอนกรีต

ตารางที่ 4 กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินและใช้สารละลาย NaOH เร่งปฏิกิริยา ที่อายุ 3, 7, 14, 28 และ 60 วัน

ส่วนผสม	**กำลังอัด (กก./ซม.^{2})**					**ร้อยละกำลังอัดเทียบกับกำลังอัดที่อายุ 3 วัน**				
	3 วัน	**7 วัน**	**14 วัน**	**28 วัน**	**60 วัน**	**3 วัน**	**7 วัน**	**14 วัน**	**28 วัน**	**60 วัน**
IF 40	153	208	282	319	330	100	136	184	208	215
IF40 - 0.25M	166	215	293	332	338	100	129	176	200	203
IF40 - 0.50M	190	239	313	346	357	100	126	165	183	188
IF40 - 0.75M	167	216	291	326	338	100	129	174	195	202
IF 50	133	166	251	299	317	100	125	189	224	237
IF50 - 0.25M	147	187	262	308	318	100	127	178	210	216
IF50 - 0.50M	205	256	324	363	386	100	125	158	177	188
IF50 - 0.75M	140	177	259	319	336	100	126	185	228	240
IF 60	97	142	208	252	274	100	147	215	261	283
IF60 - 0.25M	106	146	242	265	297	100	139	229	251	281
IF60 - 0.50M	147	205	268	289	311	100	139	182	196	211
IF60 - 0.75M	124	188	250	303	319	100	152	202	245	258

เถ้าถ่านหินมีกำลังอัดสูงขึ้นตามระยะเวลาที่นานขึ้น [14], [17], [21]

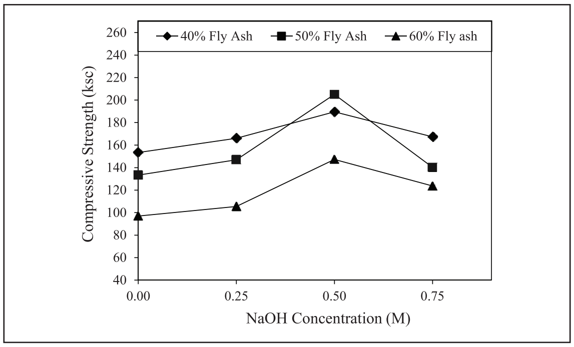
การศึกษาครั้งนี้พบว่า การพัฒนากำลังอัดมีแนวโน้มลดลง เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์สูงขึ้น เช่น คอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 40 และใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0, 0.25, 0.50 และ 0.75 โมลาร์ มีร้อยละของกำลังอัดที่อายุ 60 วัน เทียบกับอายุ 3 วัน เท่ากับ 215, 203, 188 และ 202 ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากกลุ่มที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการเร่งปฏิกิริยาปอซโซลาน มีกำลังอัดระยะต้นสูงอยู่แล้ว จึงมีผลให้การพัฒนากำลังอัดที่แสดงในรูปของร้อยละกำลังอัดที่อายุใดๆ เทียบกับอายุ 3 วัน มีแนวโน้มลดลง

3.2 ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังอัดของคอนกรีต

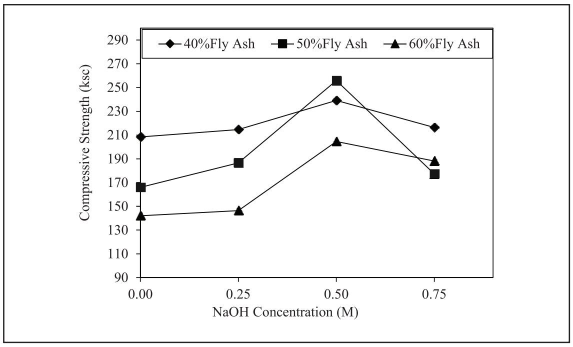
เมื่อพิจารณาผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่อกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน ดังรูปที่ 3 (ก), 3 (ข), 3 (ค), 3 (ง) และ 3 (จ) ที่แสดงผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังอัดของคอนกรีต ที่อายุ 3, 7, 14, 28 และ 60 วัน ตามลำดับ พบว่าในทุกกลุ่มการแทนที่ของเถ้าถ่านหินที่ใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 0.50 โมลาร์ ให้กำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมสารละลาย NaOH ในทุกอายุการทดสอบ และมีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจน เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย NaOH สูงขึ้น ซึ่งผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่ 0.50 โมลาร์ มีความเหมาะสมในการชะเอาซิลิก้าออกจากเถ้าถ่านหิน เพื่อเข้าทำปฏิกิริยาปอซโซลานกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน การลดลงของกำลังอัดคอนกรีตเมื่อใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นสูงขึ้น อาจเป็นผลจากความเข้มข้นของ NaOH ที่สูงเกินไป อาจเหลือจากการชะเอาซิลิก้าจากเถ้าถ่านหิน ซึ่งลักษณะโดยทั่วไปของ NaOH เมื่อเจอความชื้น จะทำให้ลื่นมากขึ้นและส่งผลให้แรงยึดเกาะภายในเนื้อคอนกรีตลดต่ำลง ส่งผลให้กำลังของคอนกรีตลดลงได้ [22]–[24] เช่น กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 40 และใช้สารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 0, 0.25, 0.50 และ 0.75 โมลาร์ ให้กำลังอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 319, 332, 346 และ 326 กก./ซม.^{2} ตามลำดับ

การใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 0.50 โมลาร์ มีผลต่อการเพิ่มกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหินในปริมาณสูงมากกว่าปริมาณต่ำ เช่น คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และใช้สารละลาย NaOH เข้มข้นเท่ากับ 0.50 โมลาร์ มีกำลังอัดที่อายุ 60 วัน เพิ่มขึ้น เท่ากับ 27 กก./ซม.^{2} (เพิ่มจาก 330 กก./ซม.^{2} ในคอนกรีต IF40 เป็น 357 กก./ซม.^{2} ในคอนกรีต IF40-0.50M) ส่วนกลุ่มที่ใช้เถ้าถ่านหินปริมาณสูง เช่น ร้อยละ 60 ที่ใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นเดียวกัน มีกำลังอัดเพิ่มขึ้นถึง 37 กก./ซม.^{2} (เพิ่มจาก 274 กก./ซม.^{2} ในคอนกรีต IF60 เป็น 311 กก./ซม.^{2} ในคอนกรีต IF60-0.50M) ซึ่งแสดงให้เห็นว่า สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ มีผลต่อกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินในปริมาณสูง มากกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินในปริมาณต่ำ ทั้งนี้อาจเป็นผลจากการใช้เถ้าถ่านหินในปริมาณสูง ส่งผลให้ซิลิก้าที่ถูกชะโดยสารละลาย NaOH มีปริมาณมากขึ้น และเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานที่ส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตสูงขึ้นได้ และการใช้ปริมาณของสารเร่งปฏิกิริยาในปริมาณที่เหมาะสมที่สุด จะสามารถทำให้คอนกรีตมีกำลังรับแรงได้สูงสุด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Boakye [25] Mustafa และ Bakri [26]

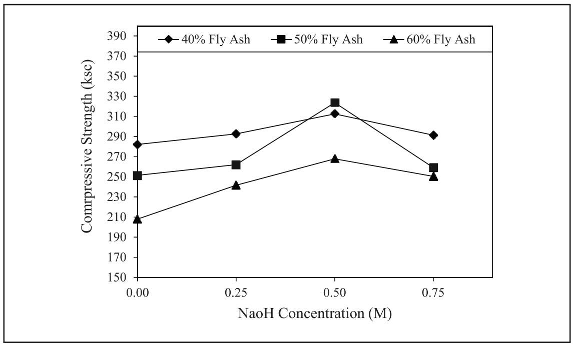
การศึกษาครั้งนี้พบว่า ที่อายุคอนกรีตนานขึ้นเป็น 60 วัน [รูปที่ 3 (จ)] มีผลทำให้คอนกรีตกลุ่มที่ใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้น 0.75 โมลาร์ มีกำลังอัดสูงกว่ากลุ่มที่ใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้น 0.50 โมลาร์เล็กน้อย โดยคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 60 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีกำลังอัดที่อายุ 60 วัน ของกลุ่มที่ใช้ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH เท่ากับ 0.50 โมลาร์ เท่ากับ 311 กก./ซม.^{2} และกำลังอัดเพิ่มขึ้นเป็น 319 กก./ซม.^{2} เมื่อใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 0.75 โมลาร์



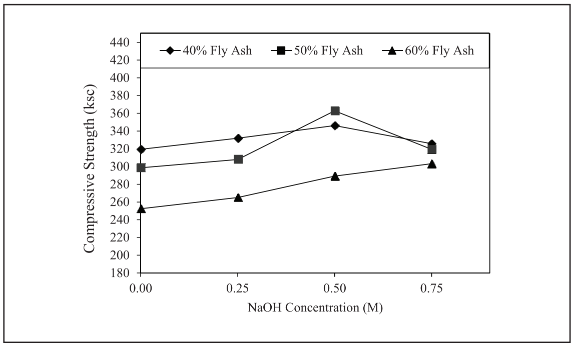
(ก) อายุบ่มคอนกรีต 3 วัน



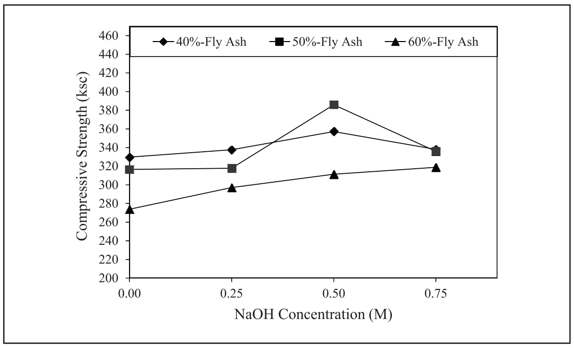
(ข) อายุบ่มคอนกรีต 7 วัน



(ค) อายุบ่มคอนกรีต 14 วัน



(ง) อายุบ่มคอนกรีต 28 วัน



(จ) อายุบ่มคอนกรีต 60 วัน

รูปที่ 3 ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังอัดของคอนกรีต

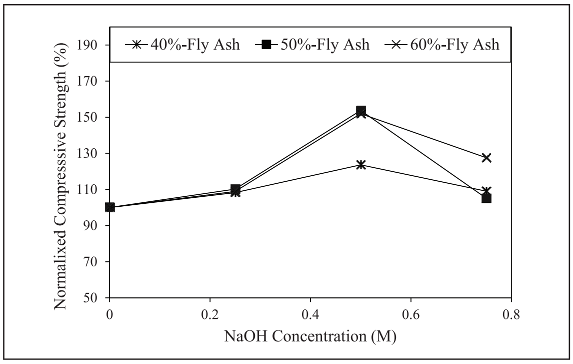
อย่างไรก็ตามการใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 0.75 โมลาร์ ถึงแม้จะให้กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 60 วัน สูงที่สุด แต่กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุต้นค่อนข้างต่ำ จึงไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นส่วนผสมเพื่อใช้ในงานก่อสร้าง ประกอบกับการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 0.50 โมลาร์ ให้กำลังอัดที่อายุอื่นที่สูงกว่ากลุ่มที่ใช้สารละลาย NaOH เข้มข้นเท่ากับ 0.75 โมลาร์ ค่อนข้างชัดเจน ตลอดจนที่ความเข้มข้นที่ต่ำกว่าทำให้ต้นทุนการผลิตคอนกรีตลดลงได้

เมื่อพิจารณาผลของความเข้มข้นของสารละลาย

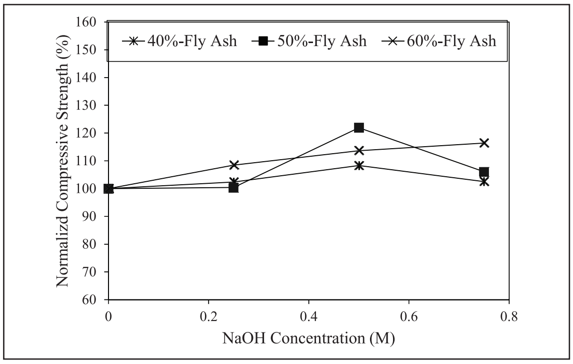
NaOH ต่อกำลังอัดของคอนกรีต ในรูปของร้อยละกำลังอัดเทียบกับกลุ่มควบคุม (Normalized Compressive Strength) ดังตารางที่ 5 พบว่า ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่ 0.25, 0.50 และ 0.75 โมลาร์ ของทุกกลุ่มการแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหิน มีค่าร้อยละกำลังอัดของคอนกรีตเทียบกับกลุ่มควบคุมมากกว่าร้อยละ 100 ซึ่งแสดงชัดเจนมากขึ้นว่า การใช้สารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 0.50 โมลาร์ ส่งผลดีต่อการปรับปรุงกำลังอัดของคอนกรีตทั้งอายุต้นและอายุปลาย ซึ่งสอดคล้องกับการใช้งานวิจัยของ Mustafa และ Bakri [27] ที่ใช้ปริมาณของด่างเร่งปฏิกิริยาที่ดีและเหมาะสมที่สุด จะทำให้กำลังรับแรงได้ดีและดีกว่ากลุ่มควบคุม โดยเฉพาะในกลุ่มที่ใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในปริมาณสูง (ร้อยละ 60) โดยให้ผลในทิศทางเดียวกันทั้งที่อายุต้น [รูปที่ 4 (ก)] และอายุมากขึ้นเป็น 60 วัน [รูปที่ 4 (ข)] เช่น ร้อยละของกำลังอัดของคอนกรีตเมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุม ที่อายุ 3 และ 60 วัน ที่ใช้เถ้าถ่านหินร้อยละ 60 และใช้สารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 0.50 โมลาร์ มีค่าเท่ากับร้อยละ 152 และ 114 ตามลำดับ

ตารางที่ 5 ร้อยละกำลังอัดเทียบกับกลุ่มควบคุม ที่อายุ 3, 7, 14, 28 และ 60 วัน

ส่วนผสม	ร้อยละกำลังอัดเทียบกับกลุ่มควบคุม				
	3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	60 วัน
IF 40	100	100	100	100	100
IF40 - 0.25M	108	103	104	104	102
IF40 - 0.50M	124	115	111	108	108
IF40 - 0.75M	109	104	103	102	103
IF 50	100	100	100	100	100
IF50 - 0.25M	110	112	104	103	100
IF50 - 0.50M	154	154	129	122	122
IF50 - 0.75M	105	107	103	107	106
IF 60	100	100	100	100	100
IF60 - 0.25M	109	103	116	105	108
IF60 - 0.50M	152	144	129	115	114
IF60 - 0.75M	128	132	120	120	116



(ก) อายุบ่มคอนกรีต 3 วัน



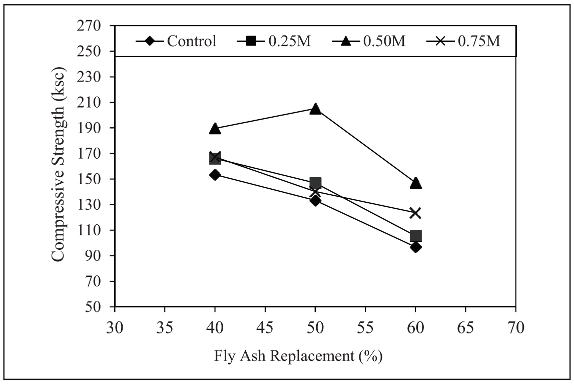
(ข) อายุบ่มคอนกรีต 60 วัน

รูปที่ 4 ผลของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อร้อยละกำลังอัดของคอนกรีตเทียบกับกลุ่มควบคุม

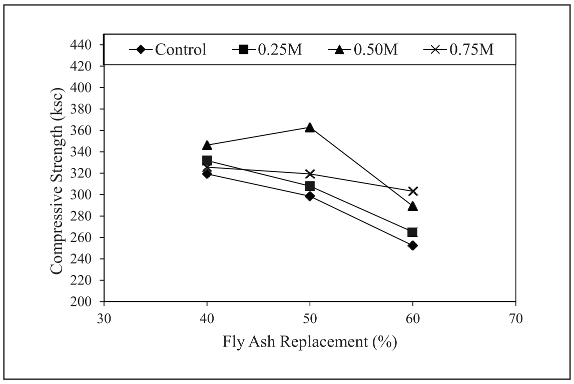
3.3 ผลของปริมาณเถ้าถ่านหินต่อกำลังอัดของคอนกรีต

เมื่อพิจารณาผลของปริมาณการแทนที่เถ้าถ่านหินในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ต่อกำลังอัดของคอนกรีต ที่อายุการบ่ม 3 และ 28 วัน ดังรูปที่ 5 (ก) และ 5 (ข) ตามลำดับ พบว่า การแทนที่เถ้าถ่านหินในปริมาณที่มากขึ้น มีผลต่อการลดลงของกำลังอัดของคอนกรีต โดยเห็นผลชัดเจนในคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมด่างเร่งปฏิกิริยา เช่น คอนกรีตที่ไม่ได้ใช้ด่างเร่งปฏิกิริยาและผสมเถ้าถ่านหินเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 40 เป็นร้อยละ 60 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีผลให้กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วันลดลงเท่ากับ 67 กก./ซม.^{2} (ลดลงจาก 319 กก./ซม.^{2} ในคอนกรีต IF40 เป็น 252 กก./ซม.^{2} ในคอนกรีต IF60)

ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Chindaprasirt *et al.* [28]–[30] ที่ได้กล่าวว่า กำลังรับแรงของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินจะลดลงตามปริมาณของเถ้าถ่านหินที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากว่าปฏิกิริยาในช่วงต้นเกิดจากปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์กับน้ำ (ปริมาณของเถ้าถ่านหินได้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1) เมื่ออายุมากขึ้นปฏิกิริยาปอซโซลานจะเกิดมากขึ้น และกำลังรับแรงของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินจะดีขึ้น เมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหิน ในขณะที่คอนกรีตกลุ่มเดียวกันนี้ที่ใช้สารละลาย NaOH เข้มข้นเท่ากับ 0.50 โมลาร์ ในการเร่งปฏิกิริยาปอซโซลาน พบว่า มีผลให้กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน ลดลง 57 กก./ซม.^{2} (ลดลงจาก 346 กก./ซม.^{2} ในคอนกรีต IF40-0.50M เป็น 289 กก./ซม.^{2} ในคอนกรีต IF60-0.50M) และมีแนวโน้มเหมือนกันในคอนกรีตทุกอายุการบ่ม ผลดังกล่าวอาจเกิดจากปริมาณเถ้าถ่านหินที่สูงขึ้น ในคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมด่างเร่งปฏิกิริยาทำให้ลดปริมาณของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ลง ซึ่งมีผลทำให้กำลังอัดที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำลดลงด้วย [31], [32] ประกอบกับการศึกษาครั้งนี้ใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในปริมาณสูง ทำให้ปฏิกิริยาปอซโซลานที่ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดคอนกรีตน้อยกว่าผลของปฏิกิริยาไฮเดรชัน ดังนั้นการเพิ่มขึ้นของปริมาณเถ้าถ่านหิน จึงมีผลชัดเจนต่อการลดลงของกำลังอัดคอนกรีตด้วย อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาในกลุ่มที่ใช้สารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 0.50 โมลาร์ พบว่า มีผลทำให้ปฏิกิริยาปอซโซลานสมบูรณ์ และให้กำลังอัดดีขึ้น ซึ่งสังเกตจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณเถ้าถ่านหินในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตสูงกว่ากลุ่มอื่นๆ และสูงสุดเมื่อใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 50 ซึ่งผลดังกล่าวเกิดจากสารละลาย NaOH สามารถชะเอาซิลิก้า จากเถ้าถ่านหินมาทำปฏิกิริยาปอซโซลานกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และได้เป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต ที่ให้กำลังกับคอนกรีตได้ดีขึ้น [32]–[34] แสดงให้เห็นว่าสารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นเหมาะสม สามารถใช้เร่งปฏิกิริยาปอซโซลานในคอนกรีตที่ผสมวัสดุปอซโซลานได้ดีและให้กำลังสูงกว่าคอนกรีตควบคุม



(ก) อายุบ่มคอนกรีต 3 วัน



(ข) อายุบ่มคอนกรีต 28 วัน

รูปที่ 5 ผลของปริมาณเถ้าถ่านหินต่อกำลังอัดของคอนกรีต

4. สรุป

จากผลการศึกษา สามารถสรุปได้ดังนี้

1. เมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มสูงขึ้นไม่เกิน 0.50 โมลาร์ ส่งผลให้คอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินในทุกกลุ่มการแทนที่มีกำลังอัดสูงขึ้น แต่การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงกว่า 0.50 โมลาร์ ทำให้กำลังอัดของคอนกรีตมีแนวโน้มลดลง

2. ที่อายุบ่มคอนกรีตนานถึง 60 วัน พบว่า การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 0.75 โมลาร์

ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 60 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน สามารถทำให้กำลังอัดคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินสูงขึ้นได้ใกล้เคียงกับกลุ่มที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่มีความเข้มข้น 0.50 โมลาร์

3. การใช้เถ้าถ่านหินผสมในคอนกรีตในปริมาณที่สูงขึ้น มีผลต่อการลดกำลังอัดของคอนกรีต ที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์น้อยกว่ากลุ่มที่ไม่ได้ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

4. การศึกษาครั้งนี้พบว่า การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 0.50 โมลาร์ ในกลุ่มที่ใช้เถ้าถ่านหินผสมในคอนกรีตร้อยละ 50 โดยวัสดุประสาน มีความเหมาะสมในการนำไปใช้งาน เนื่องจากให้กำลังอัดของคอนกรีตสูงที่สุด โดยมีค่าเพิ่มขึ้นจากคอนกรีตควบคุมถึงร้อยละ 22 ที่อายุ 28 วัน

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ ทุนสนับสนุนการวิจัยจาก สำนักบริหารโครงการส่งเสริมการวิจัยในอุดมศึกษาและพัฒนามหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (HERP)

เอกสารอ้างอิง

[1] M. Davraz and L. Gunduz, "Engineering properties of amorphous silica as a new natural pozzolan for use in concrete," *Cement and Concrete Research*, vol. 35, pp. 1251–1261, 2005.

[2] MS. Shetty, *Concrete Technology: Theory and Practice*, 1st ed, New Delhi, India, 1982.

[3] M. Ashraf, AN. Khan, Q. Ali, J. Mirza, A. Goyal, and AM. Anwar, "Phyisco-chemical activities of minerals additives," *Construction Building Material*, vol. 23, pp. 2207–2213, 2009.

[4] B. Liu, Y. Xie, and J. Li, "Influence of steam curing on the compressive strength of concrete containing supplementary cementing materials," *Cement and Concrete Research*, vol. 35, pp. 994–998, 2005.

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

[6] Neville AM, *Properties of Concrete*, 4th ed, Pittman, London, 1995.

[7] MK. Gopalan, "Nucleation and pozzolanic factors in strength development of class F fly ash concrete," *ACI Materials Journal*, vol. 90-M12, pp. 117–21, 1993.

[8] GC. Isaia, ALG. Gastaldini, and R. Moraes, "Physical and pozzolanic action of mineral additions on the mechanical strength of high-performance concrete," *Cement and Concrete Composites*, vol. 25, pp. 69–76, 2003.

[9] D. Manmohan and PK. Mehta, "Influence of pozzolanic, slag and chemical admixtures on pore size distribution and permeability of hardened cement pastes," *Cement Concrete Aggregates*, vol. 3, pp. 5, 1981.

[10] P. Chindapasirt, C. Jaturapitakkul, and T. Sinsiri, "Effect of fly ash fineness on compressive strength and pore size of blended cement paste," *Cement and Concrete Composites*, vol. 27, pp. 425–428, 2005.

[11] AL. Velosa and PB. Cachim, "Hydraulic-lime based concrete: Strength development using a pozzolanic addition and different curing conditions," *Concrete Building Material*, vol. 23, pp. 2107–2111, 2009.

[12] C. Shi and RL. Day, "Comparison of different methods for enhancing reactivity of pozzolans," *Cement and Concrete Research*, vol. 31, pp. 813–818, 2001.

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

[14] 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. 03, pp. 15–20, 2013.

[15] S. Reaksmey and W. Chalee, "Compressive strength improvement of concrete containing rice husk ash using an alkaline activator," *The Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok*, vol. 26, no. 3, September–December 2016 (in Thai).

[16] A. Abdullah, M. S. Jaafar, Y. H. Taufiq-Yap, A. Alhozaimy, A. Al-Negheimish, and J. Noorzaei, "The effective of various chemical activators on pozzolanic reactivity: A review," *Scientific Research and Essay*, vol. 7, pp. 719–729, 23 February 2012.

[17] P. Chindaprasirt, *Fly ash in concrete work*, Department of Civil Engineering, Khon Kaen University, 2006 (in Thai).

[18] *Standard Specification for Portland cement*, ASTM C 150-07, 2007.

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

[20] *Testing concrete*, *Part 101: Method of sampling fresh concrete on site*, BS 1881, 1983.

[21] M. Thomas, "Optimizing the use of fly ash in concrete," Illinois: Portland Cement Association, IS. 548, 2007.

[22] PREVOR, "Sodium Hydroxide, NaOH Product file," *Management of ocular and cutaneous chemical splashes*, pp. 1310-73-2, 2011.

[23] K. Parthiban, "Effect of sodium hydroxide concentration and alkaline ratio on the compressive strength of slag based geopolymer concrete," *International Journal of ChemTech Research*, vol. 6, no. 4, pp. 2446–2450, July–August 2014.

[24] AK. Patra, "Effect of synthesis parameters on the compressive strength of fly ash based geopolymer concrete," *International Journal of Environmental Pollution Control & Management*, vol. 3, no. 1, pp. 79–88, July-December 2011.

[25] K. A. Boakye, "Improvement of setting time and early strength development of pozzolana cement through chemical activation," Thesis, Department of Materials Engineering, Faculty of Chemical And Materials Engineering, Kwame Nkrumah University, May 2012.

[26] H. Kamarudin, M. Bnhussain, I. Khairul Nizar, A. R.Rafiza, and Y. Zarina, "The processing, Characterization and properties of fly ash based geopolymer concrete," *Reviews on Advanced Materials Science*, vol. 30, pp. 90–97, August 2011.

[27] A. M. Mustafa and Al. Bakri, "Microstructure of different NaOH molarity of fly ash based green polymeric cement," *Journal of Engineering and Technology Research*, vol. 3, pp. 44–49, February 2011.

[28] P. Chindaprasirt, T. Chiyasena, and V. Sirivivatnanon, "High Strength concrete containing fly ash and black boiler rice husk ash," in *Proceedings of the 4th Symposium on Infrastructure*, pp. 363–368, 3–5 April 2009.

[29] M. R. Karim, M. F. M. Zain, M. Jamil, F. C. Lai, and M. N. Islam, “Strength development of mortar and concrete containing fly ash: A review,” *International Journal of the Physical Sciences*, vol. 6, no. 17, pp. 4137–4153, 2 September 2011.

[30] *Building Code Requirements for Reinforced Concrete*, ACI 318-99, 2000.

[31] PL. Owens, “Fly ash and its usage in concrete,” *The journal of the Concrete Society*, vol. 13, pp. 21–26, 1979.

[32] RO. Lane and JF. Best, “Properties and use of fly ash in Portland cement concrete,” *Concrete International*, vol. 4, no. 7, pp. 81–92, 1982.

[33] R. Helmut, *Fly ash in cement and concrete*, Illinois: Portland Cement Association, 1987.

[34] BDG. Jonhson, “The use of fly ash in Cape Town RMC operation,” in *Proceedings of the 5th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*, pp. S252/33, 1981.